

Université Batna II, Faculté de Technologie, Département
de Mécanique

MATERIAUX COMPOSITES



Module découverte destiné aux étudiants de Master 1 FM

Préparé par: Pr A. DERARDJA

Plan du cours

Chapitre 1: Généralités sur les matériaux composites.

Chapitre 2: Eléments constituant un matériau composite à matrice polymérique.

Chapitre 3: Mise en œuvre et structure des matériaux composites à matrice polymérique.

Chapitre 4: Introduction à l'élasticité dans les matériaux composites.

Chapitre 5: Propriétés élastiques des laminés.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES

Composite ?

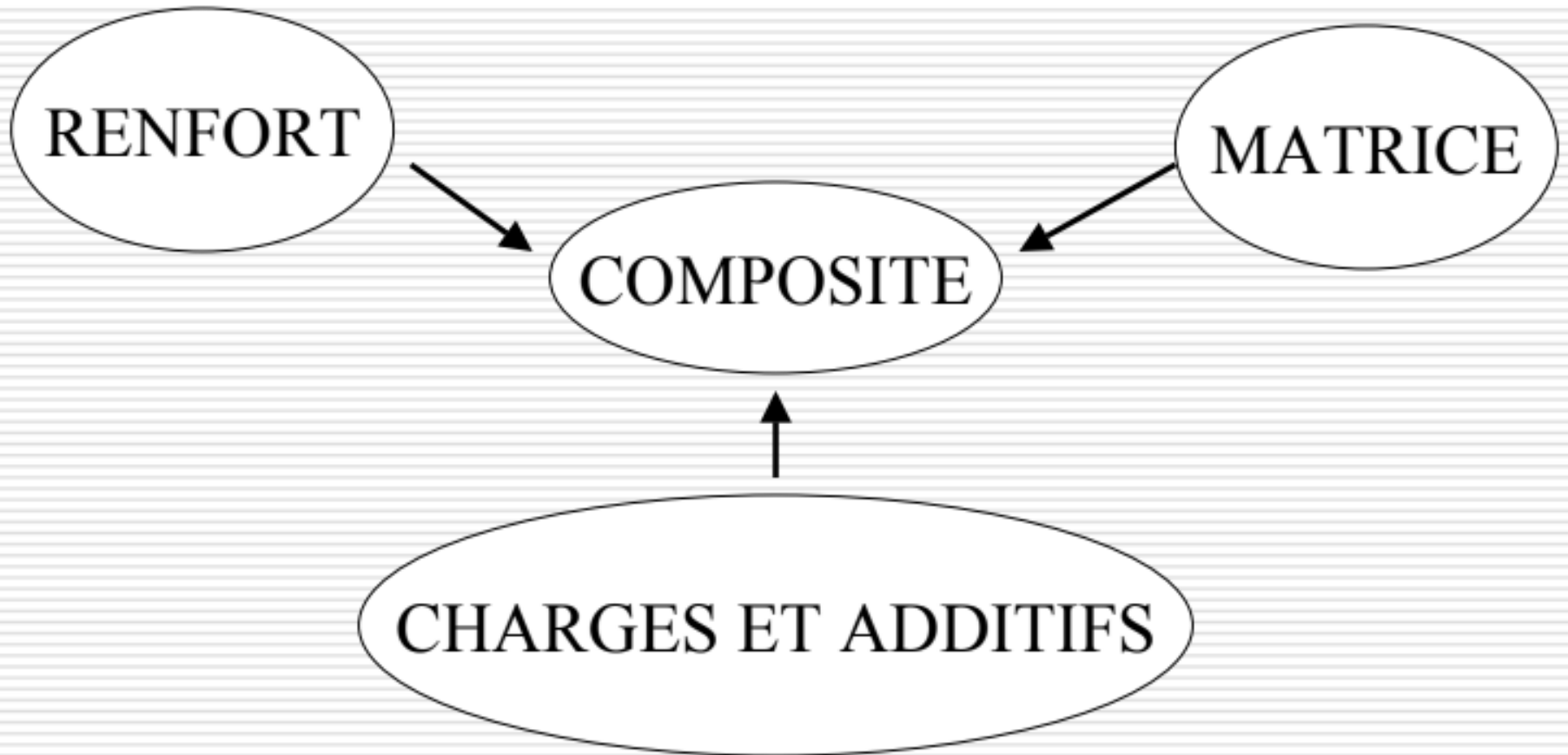
Le torchis est une technique de remplissage qui consiste à poser de la paille ou du foin torsadés dans une boue ou pâte de limon argileux sur des éclisses entre les colombages.

Le torchis lourd : Sa conductivité thermique λ est de 1,05. Il possède une masse volumique de 1 400 kg/m³.

Le torchis allégé : Sa conductivité thermique λ est de 0,12 à 0,15. Il a une masse volumique de 300 à 400 kg/m³.



DÉFINITION

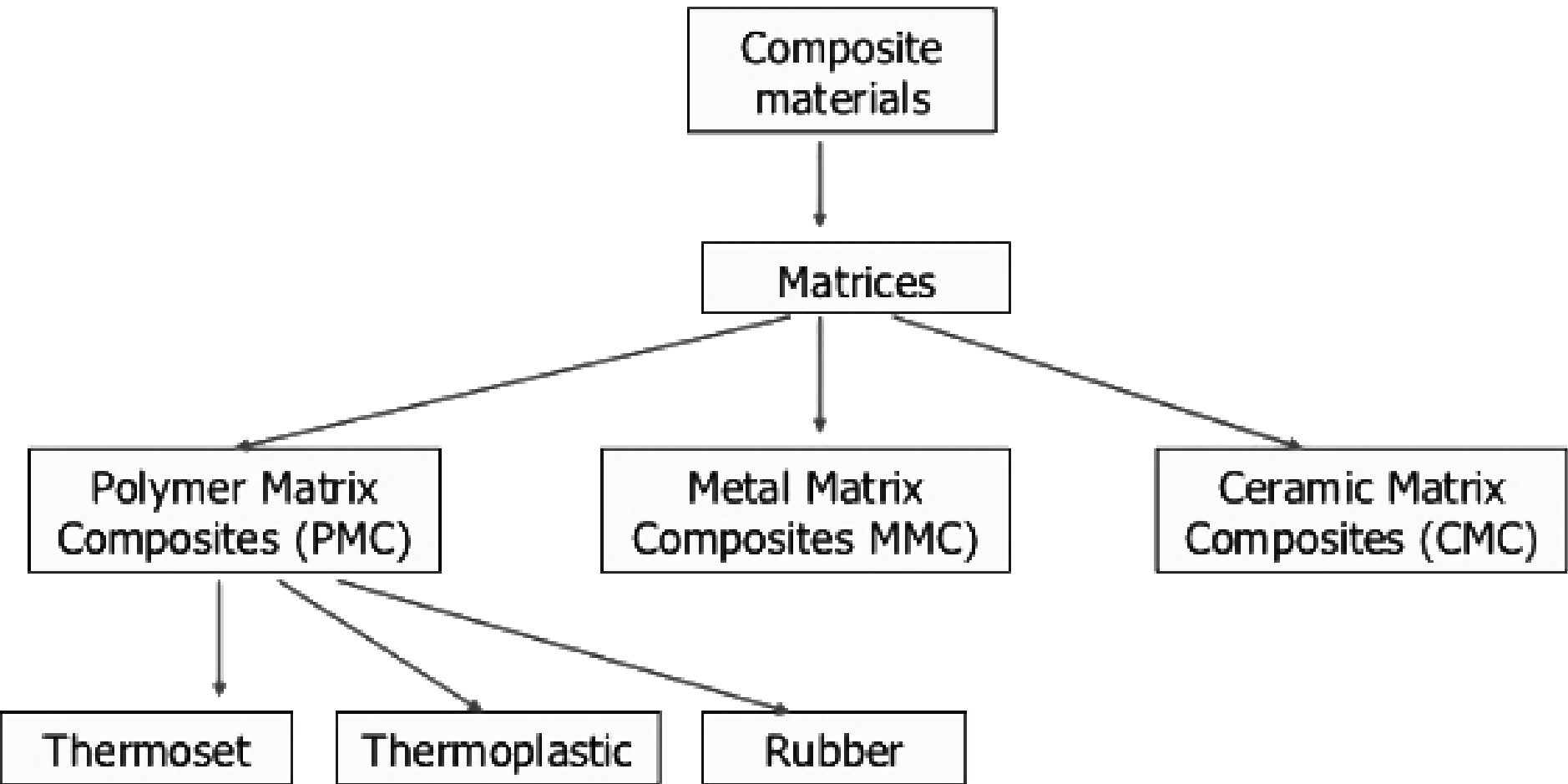


Renfort: Ossature souvent filamentaire à très hautes caractéristiques mécaniques, qui assure la tenue mécanique du composite.

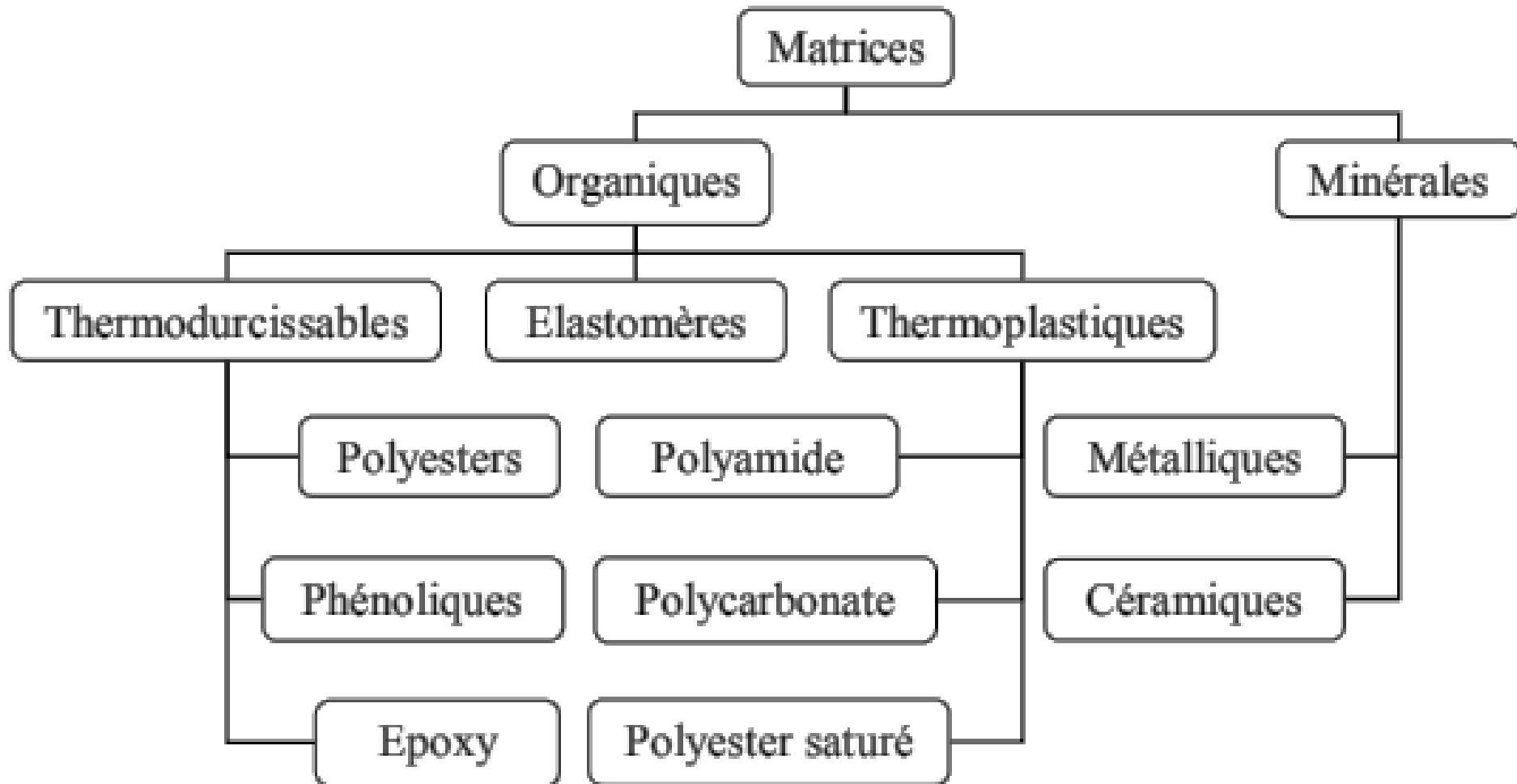
Matrice: Phase continue qui assure la cohésion de la structure, transfère et répartit les contraintes et protège les renforts des agressions extérieures.

Charges et additifs: adhérence fibre/matrice, pigments de coloration, ...

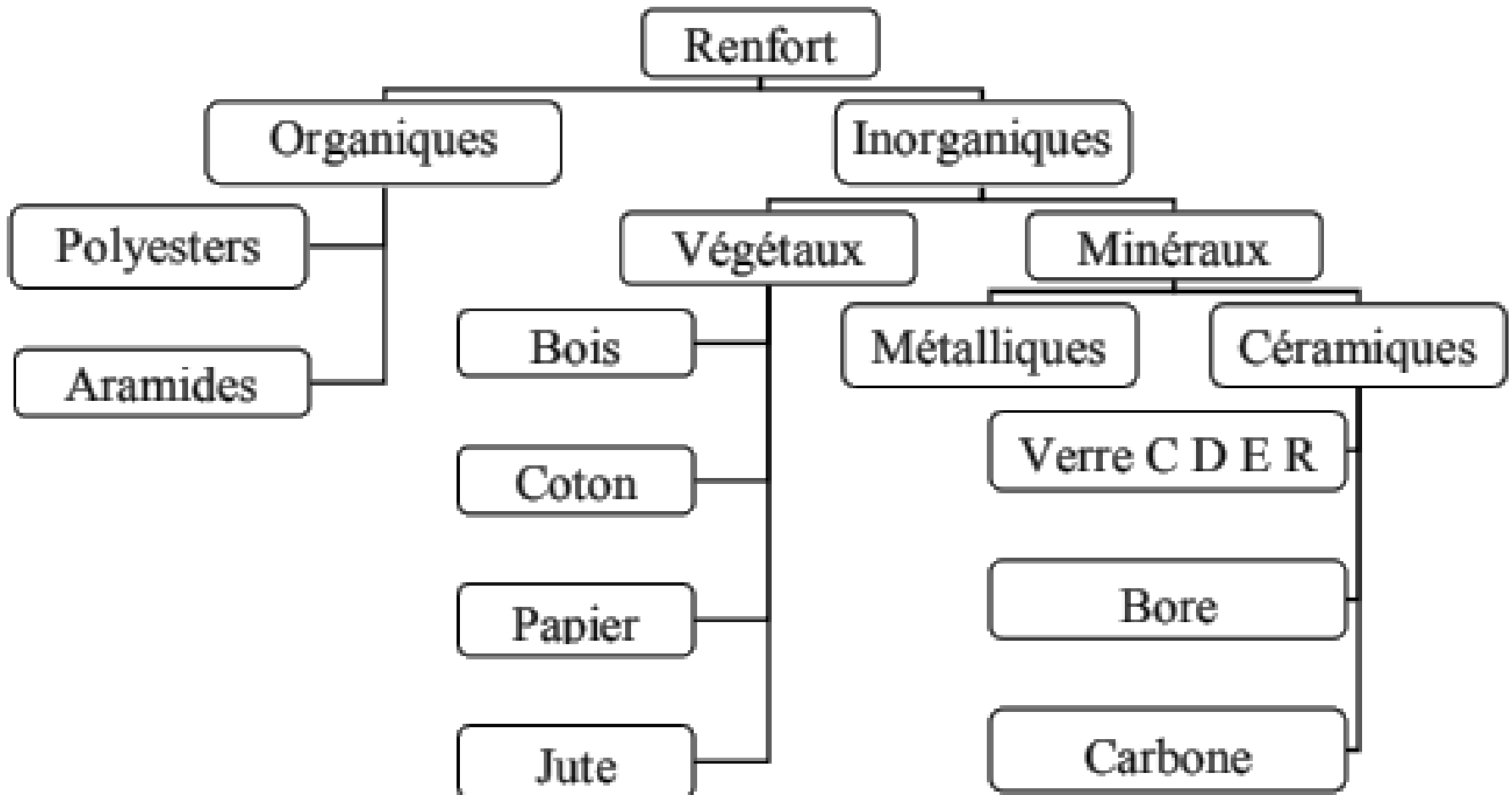
CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX COMPOSITES



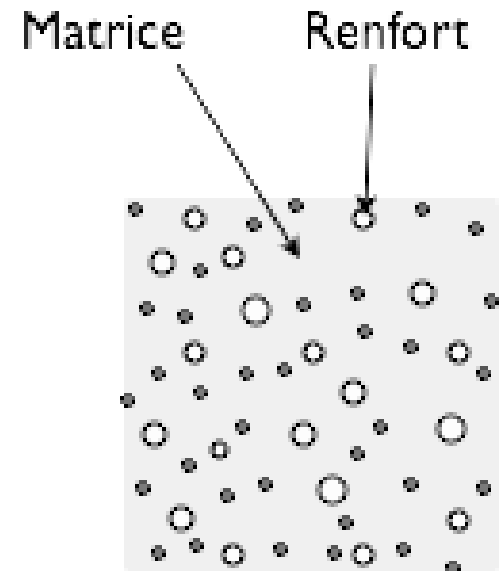
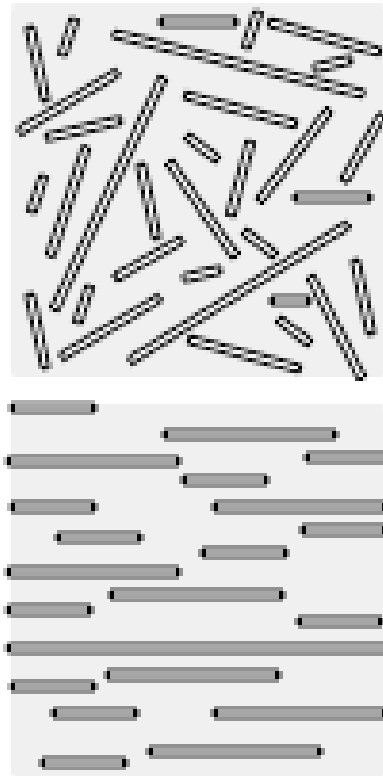
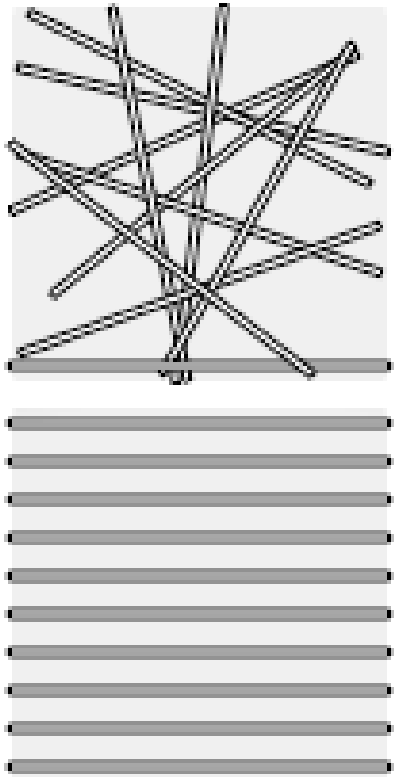
Différentes natures de matrice



Types de renforts



Classification selon la forme des constituants



Fraction Volumique:

$$v_c = v_m + v_f$$

Volume du composite

Volume de la matrice

Volume du renfort

La fraction volumique de la matrice :

$$V_m(\%) = \frac{v_m}{v_c}$$

La fraction volumique du renfort :

$$V_f(\%) = \frac{v_f}{v_c}$$

Loi des mélanges:

$$V_m + V_f + V_v = 1$$

Comme: V_v est négligeable

$$V_m + V_f = 1 \quad \Rightarrow \quad V_f = 1 - V_m$$

Fraction massique:

$$m_c = m_m + m_f$$

Masse du composite

Masse de la matrice

Masse du renfort

La fraction massique de la matrice :

$$M_m(\%) = \frac{m_m}{m_c}$$

La fraction massique du renfort :

$$M_f(\%) = \frac{m_f}{m_c}$$

$$V_m + V_f = 1$$

Par ailleurs:

$$m_m = \rho_m V_m, \quad m_f = \rho_f V_f \quad \text{et} \quad m_c = \rho_c V_c$$

Alors:

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} M_c$$

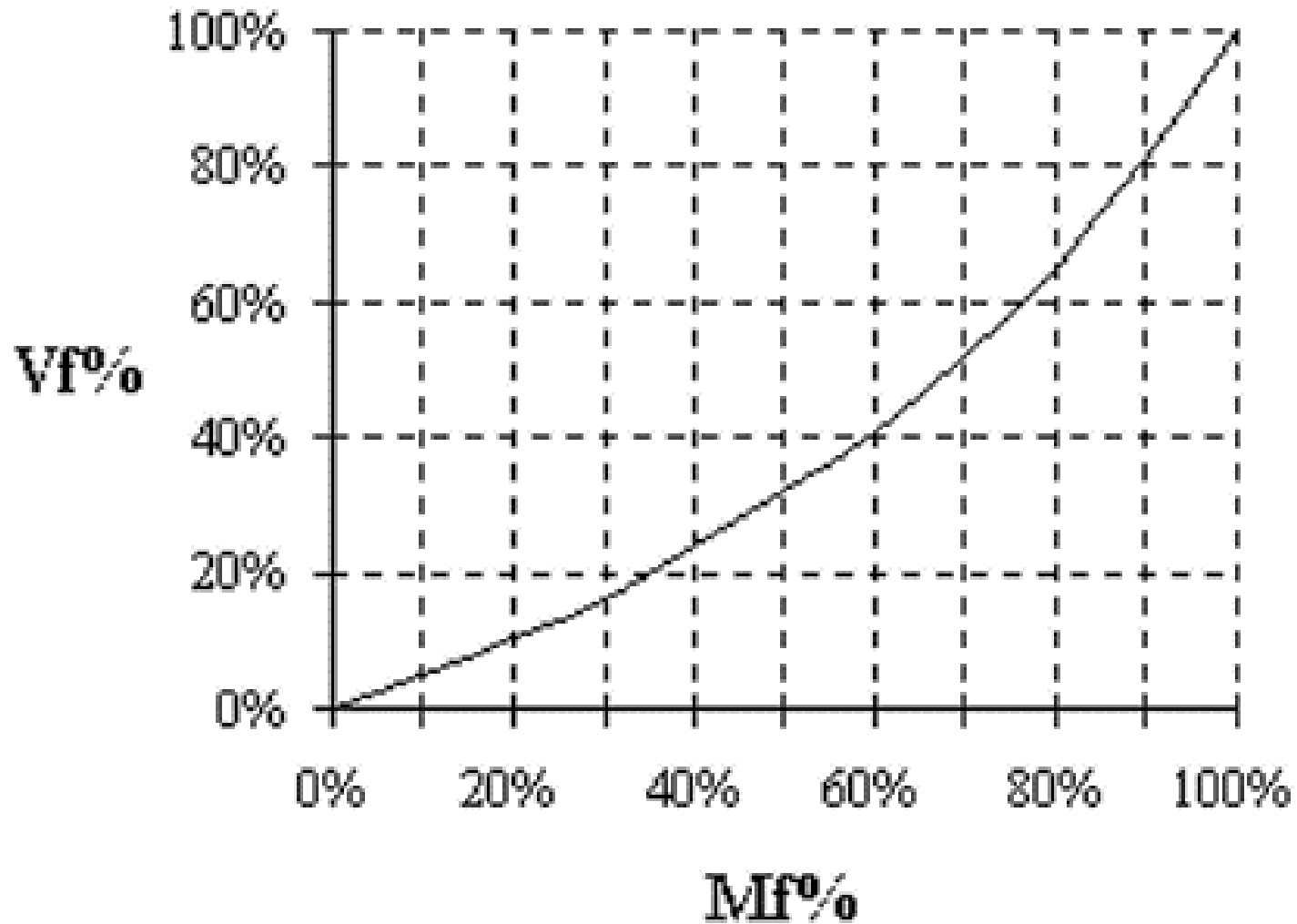
et

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} M_f$$

$$\Rightarrow \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m + \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f = 1 \quad \rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Pour un composite à n constituants: $\rho_c = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i$

Vf% vs Mf%



df = 2.6 et dm = 1.2

MATERIAU COMPOSITE A MATRICE POLYMERIQUE

LES MATRICES THERMODURCISSABLES

Durcissement définitif lors du cycle de polymérisation:
transformation irréversible

Principales résines thermodurcissables

Les résines polyesters insaturées

Les résines de condensation

Les résines époxydes



LES MATRICES THERMOPLASTIQUES

Polymères mis en forme par chauffage et durcissement au cours du refroidissement : **transformation réversible**

Un polymère thermoplastique peut être amorphe ou semi-cristallin.

- Une matière plastique translucide est généralement semi-cristalline
- Une matière transparente est toujours amorphe.



Plastiques de hautes performances

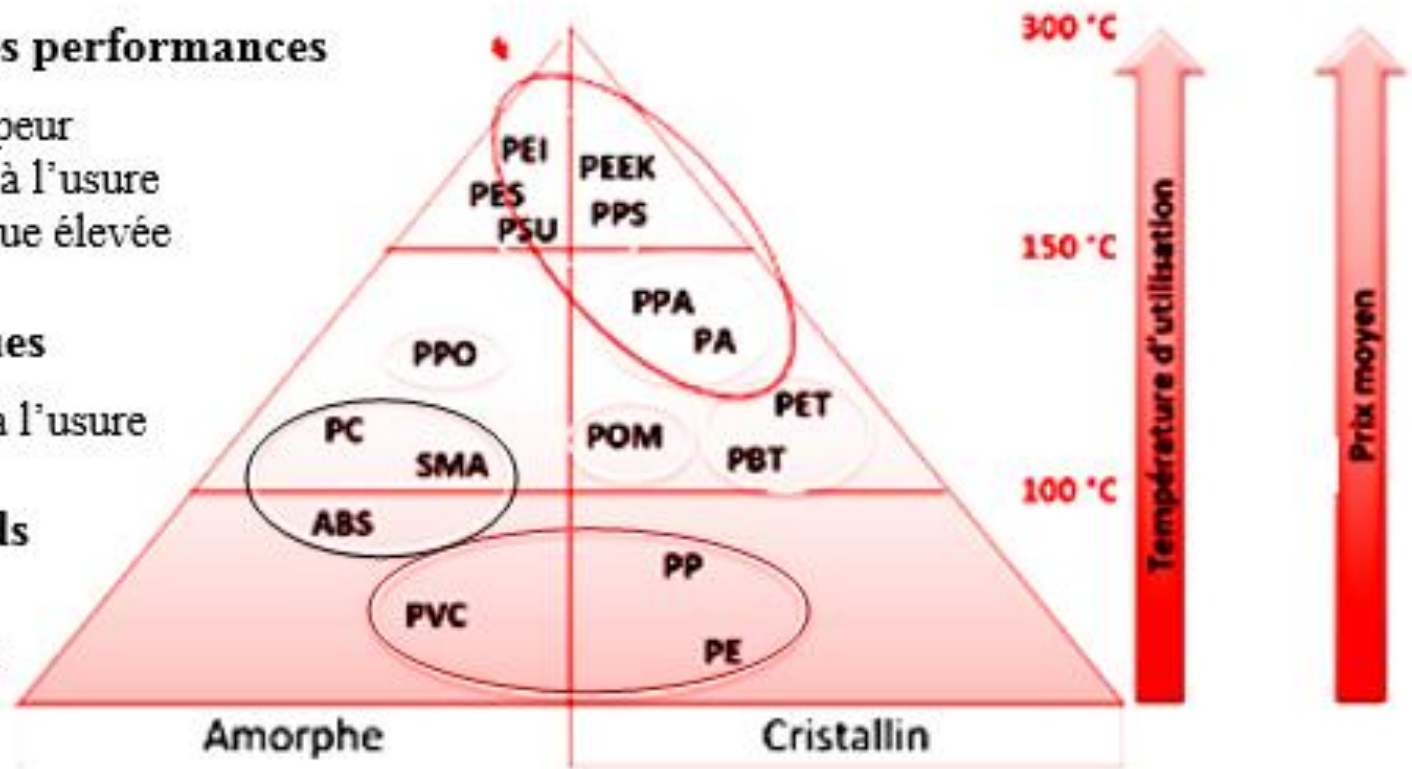
Résistance à la vapeur
Résistance élevée à l'usure
Résistance chimique élevée

Plastiques techniques

Bonne résistance à l'usure

Plastiques standards

Bonne adhérence
Bonne formabilité



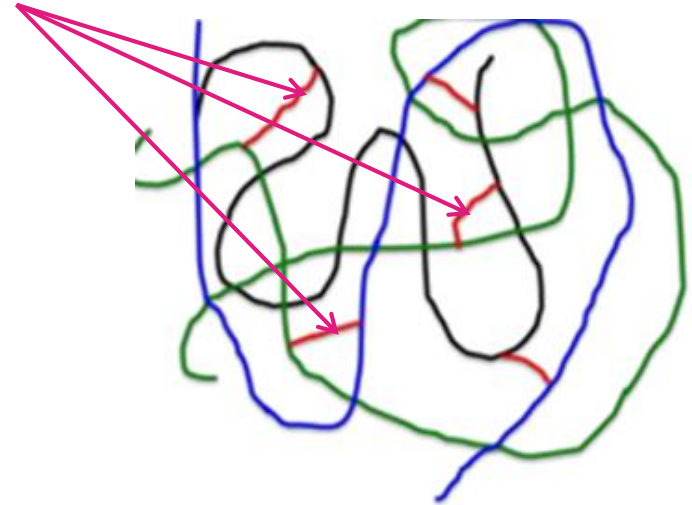
Pyramide des thermoplastiques



Thermoplastique
chaînes indépendantes

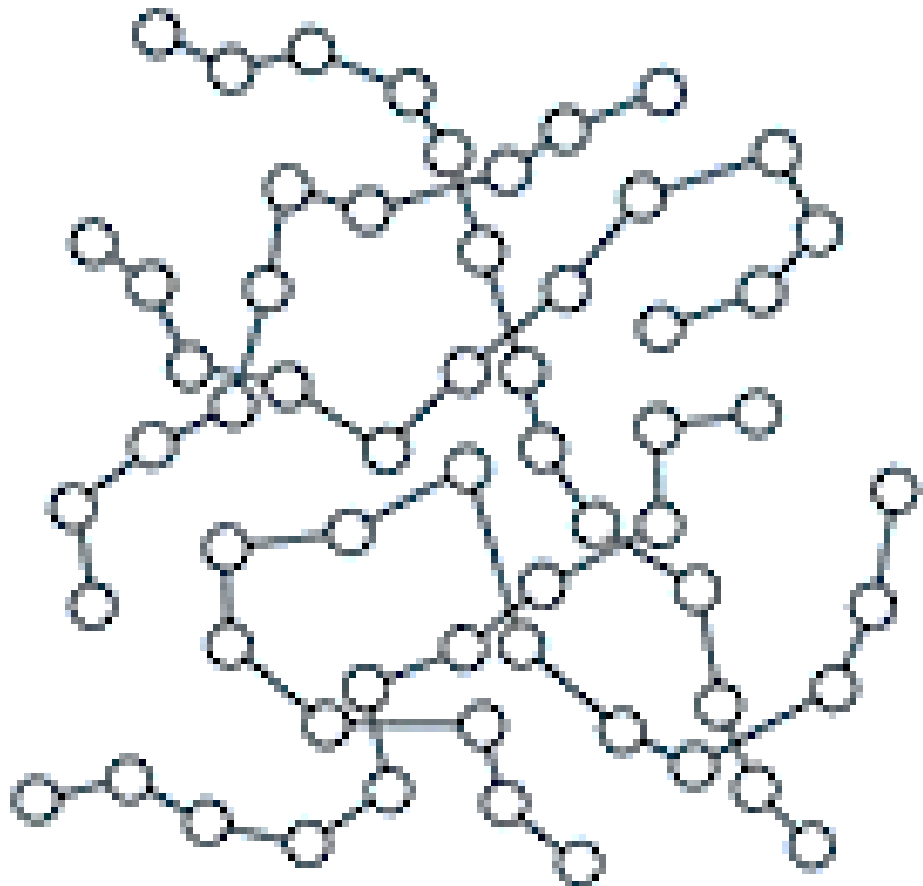


Ponts entre chaînes

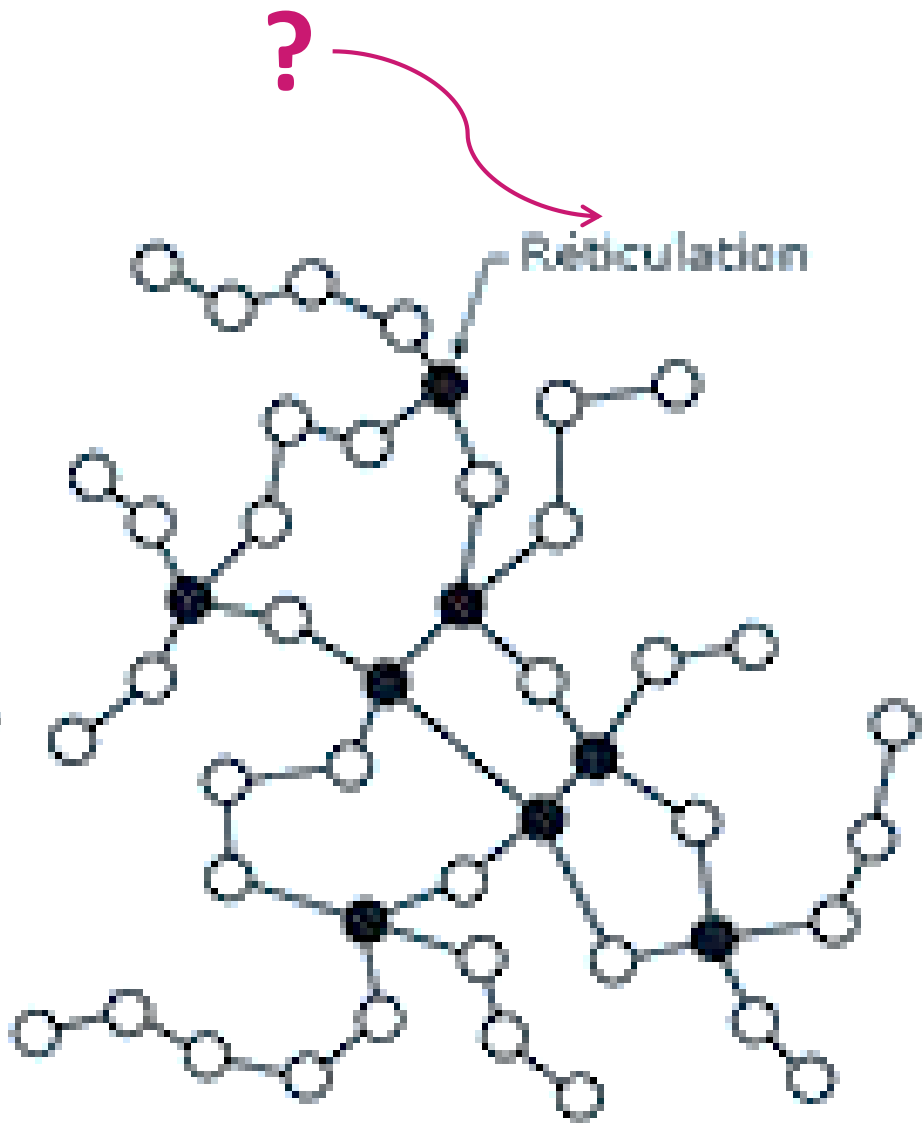


Thermodurcissable
En réseau





{a} Thermoplastique



{b} Thermodurcissable

La réticulation détermine de nombreuses caractéristiques des plastiques thermodurcissables.

Elle les rend solides, dimensionnellement stables et très résistants à la chaleur et aux produits chimiques .

Les moules souples en silicone alimentaire en sont un exemple.



LES CHARGES

Toute substance inerte, minérale ou végétale laquelle, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés du composite.

Types de charges:

- charges sphériques (microbilles en verre, microbilles en carbone, microbilles organiques,...)
- charges non sphériques (mica, carbonates, silicates, silices,...)

LES ADDITIFS OU ADJUVANTS

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

LES FIBRES ET LES TISSUS DE RENFORT

les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres.

Ces fibres sont commercialisées:

- sous forme linéique (fils, mèches,...)
- sous forme de tissu surfacique (tissu simple, mat,...)
- sous forme multidirectionnelle (tresses, tissu complexe, tissu 3 D,...)

LES FIBRES LINÉIQUES

Les fibres sont réunies en fils ou en mèches (roving) de différentes formes. Les fils, soit continus ou discontinus, sont caractérisés par leur masse linéique ou titre.



La masse linéique exprimée, en Tex, est:

1 Tex = 10^{-6} Kg /m ou encore 1 Tex = 1 g/km.

Pour un renforcement effectif dans le sens de la longueur de la fibre, On définit ce qu'on appelle: **la longueur critique**

La longueur critique $l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau}$

La résistance en traction

diamètre de la fibre

La résistance de la matrice en cisaillement

LES FIBRES SURFACIQUES

Les Mats:

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle.

Suivant la mise en œuvre, ces fils sont maintenus (ou non) dans les résines par un liant.



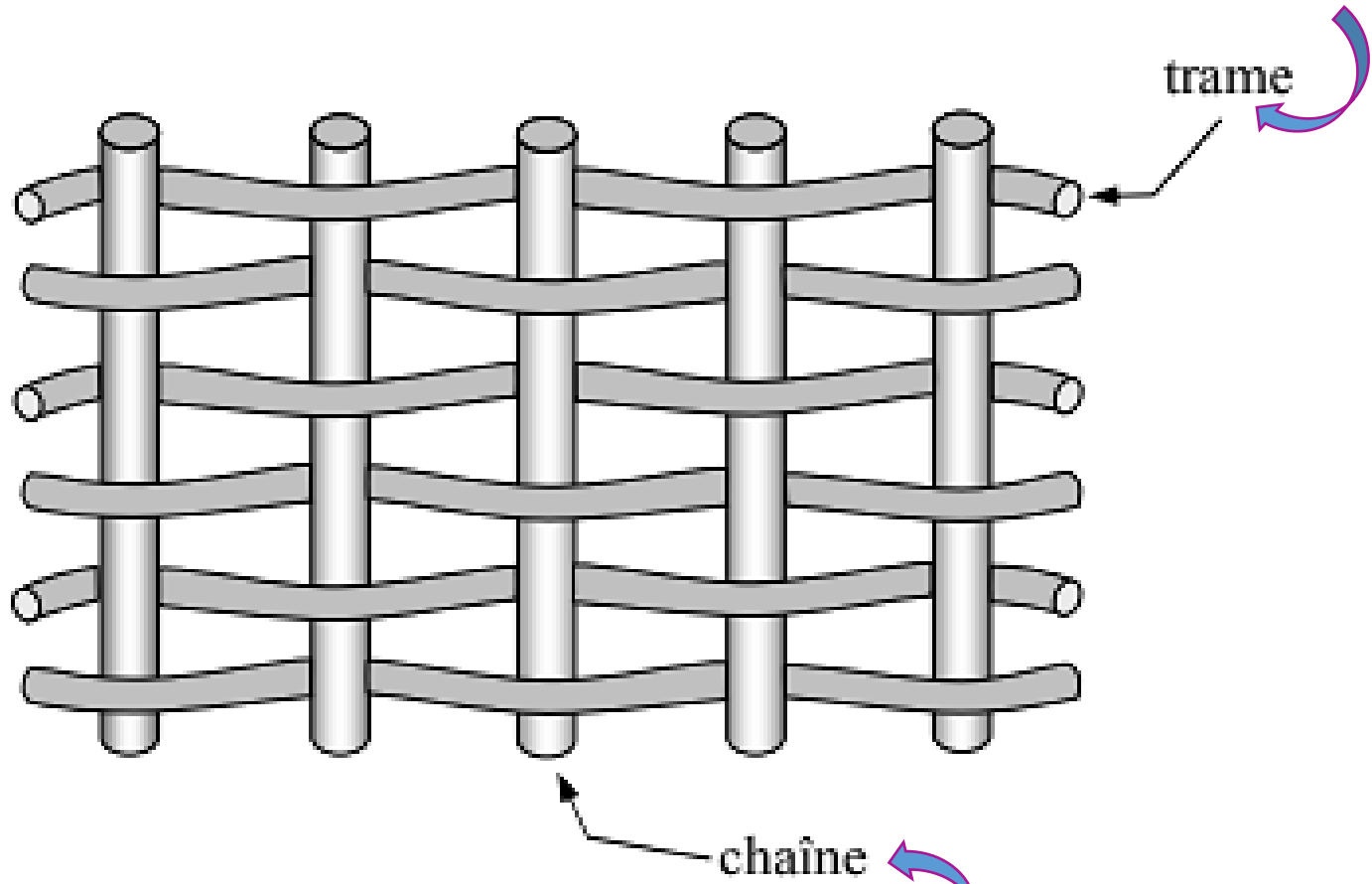
Les tissus et rubans:

Un ensemble surfacique de fils, de mèches, de prepregs,...etc. Ils sont constitués d'une chaîne et d'une trame



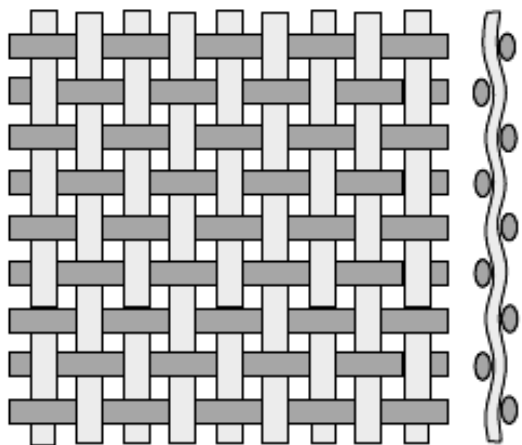
LES MODES DE TISSAGE

Ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne

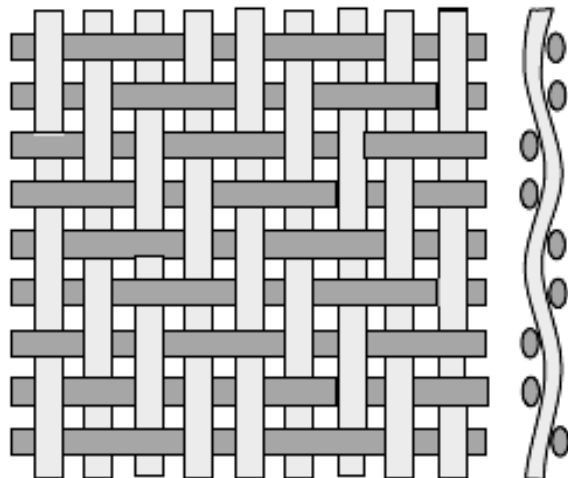


Ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du tissu

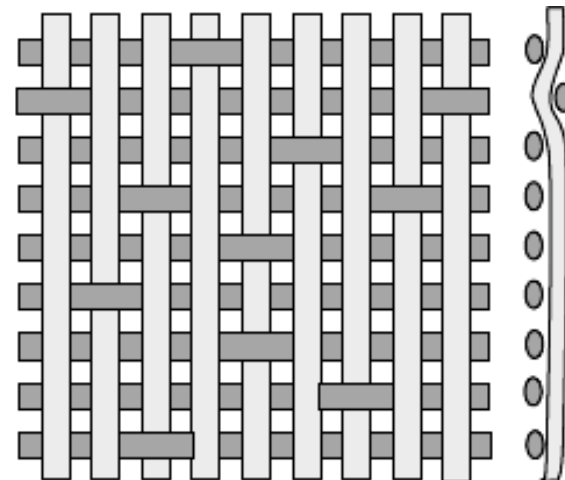
Les armures



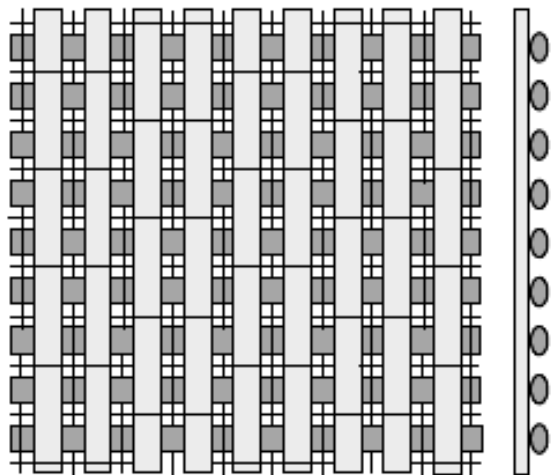
Taffetas



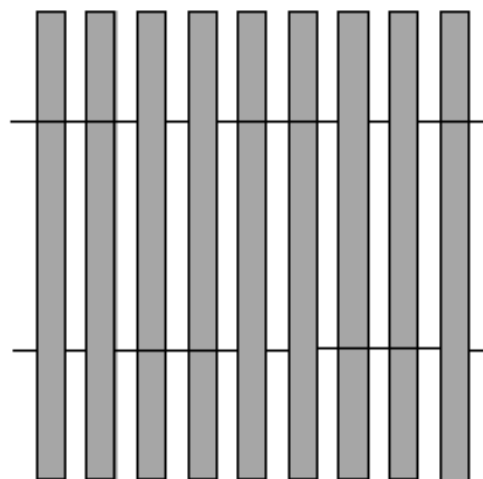
Sergé



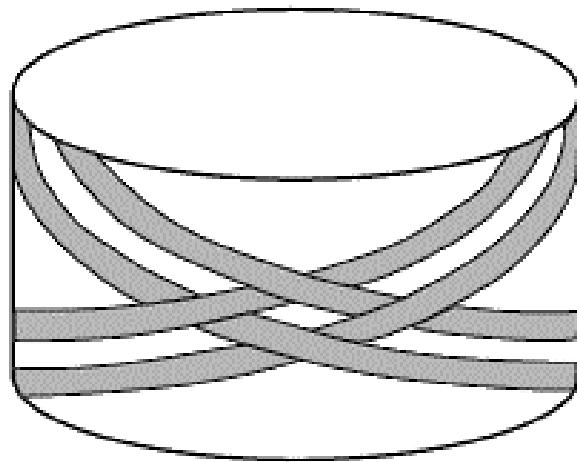
Satin



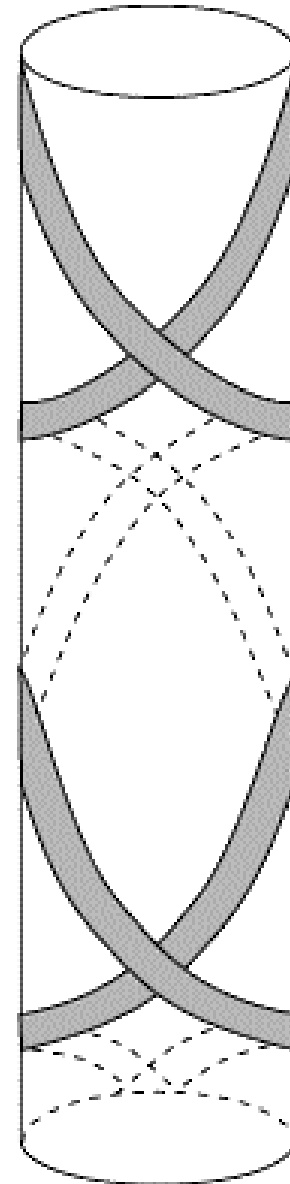
Croisée

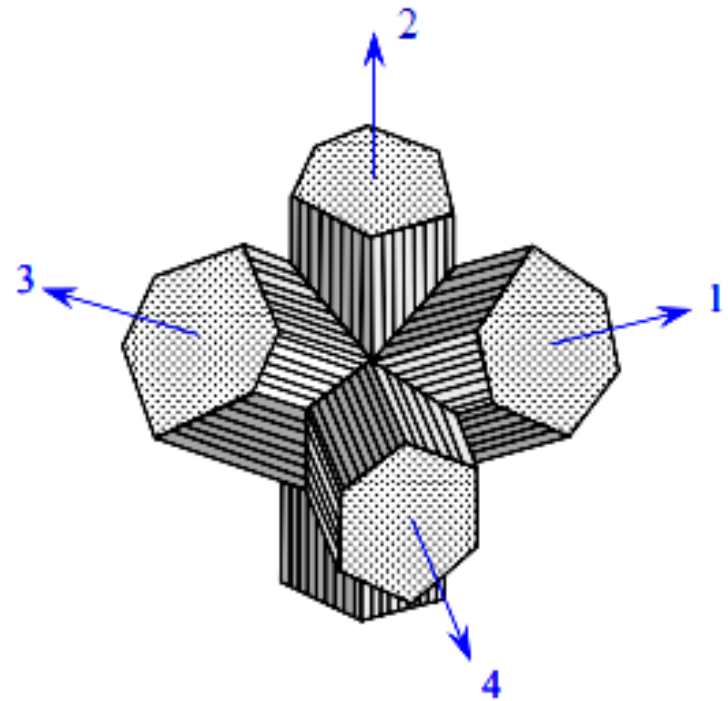
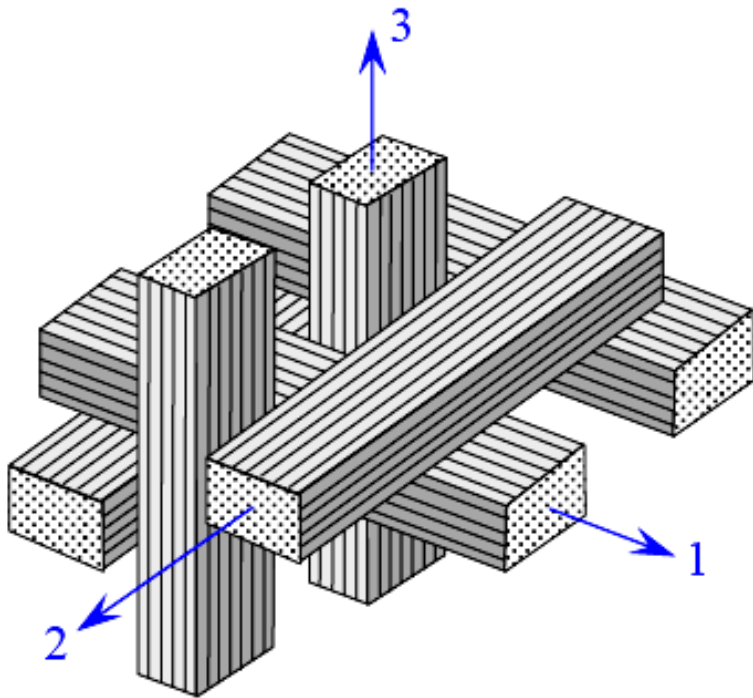


Unidirectionnelle



Tissage cylindrique





Tissage volumique

LES PRINCIPALES FIBRES

LES FIBRES DE VERRE

Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres :

- **E** : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- **R** : pour les composites hautes performances ;
- **D** : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

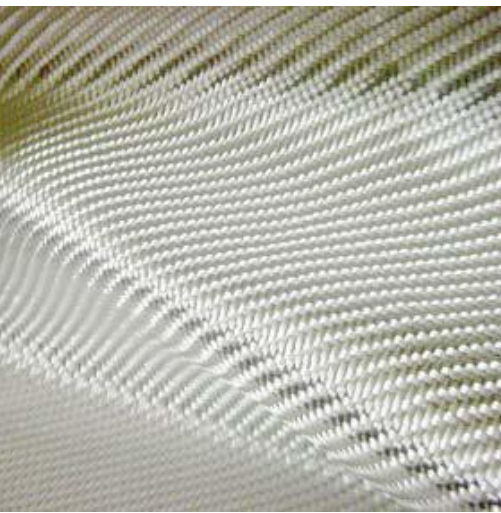
- ✓ Utilisé dans plus de 95 % des composites
- ✓ Prix bas
- ✓ Grande déformation à rupture
- ✓ Rigidité insuffisante dans certaines pièces de structure



microbilles creuses



fibres courtes

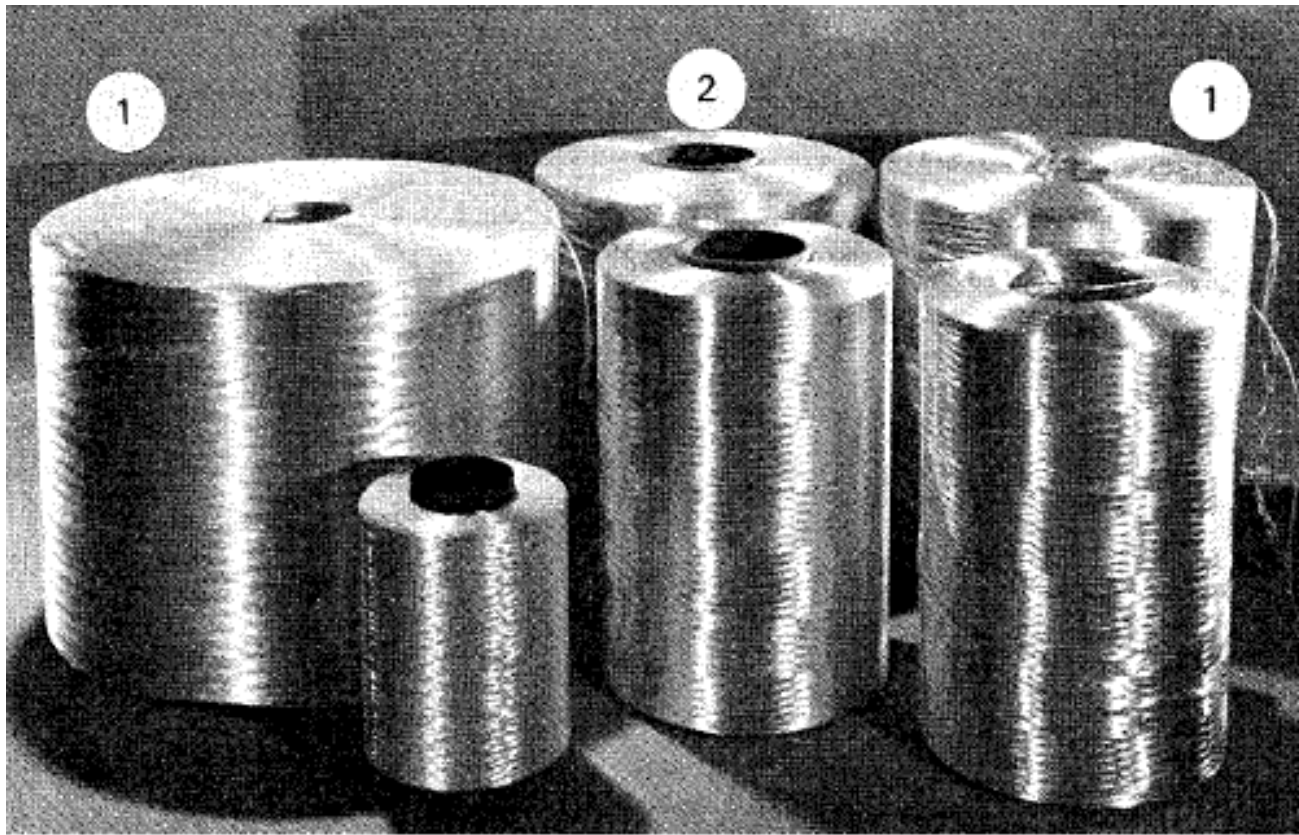


Fibre de verre tissée



Stratifil ou Roving

fibres longues



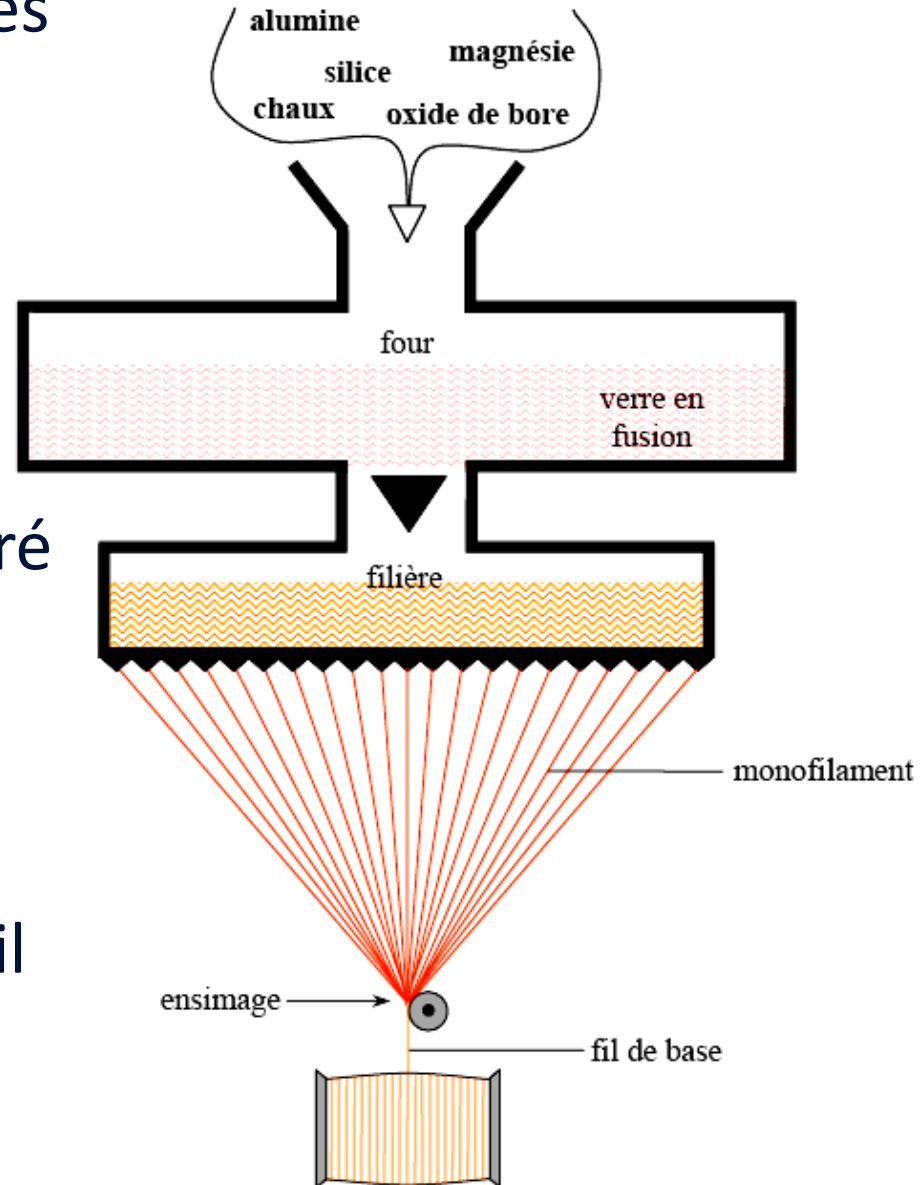
Le Stratifil (Roving) obtenu par assemblage sans torsion de fils de base silionne présenté en pelotes (1) et en bobines (2).

La désignation du stratifil indique soit la masse linéique, soit le nombre de fils de base

Procédé d'étirage mécanique ou sillionne

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières . A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi.

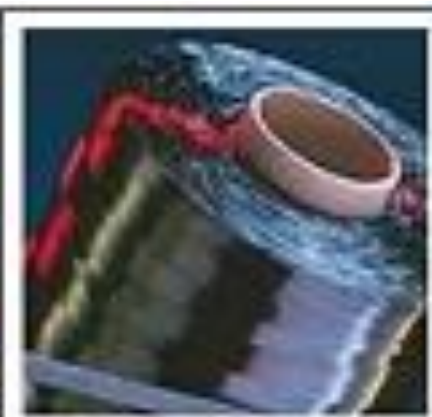
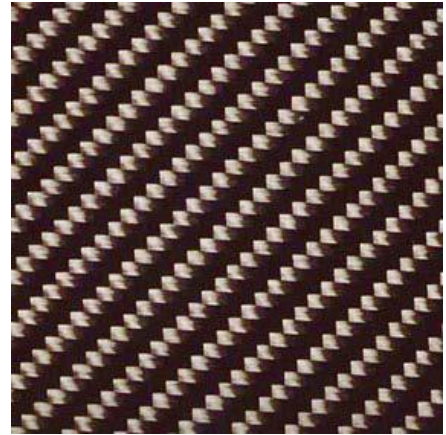
Les monofilaments sont ensuite rassemblés pour constituer un fil de base appelé sillionne qui est enroulé en bobine ou sous forme de pelote.





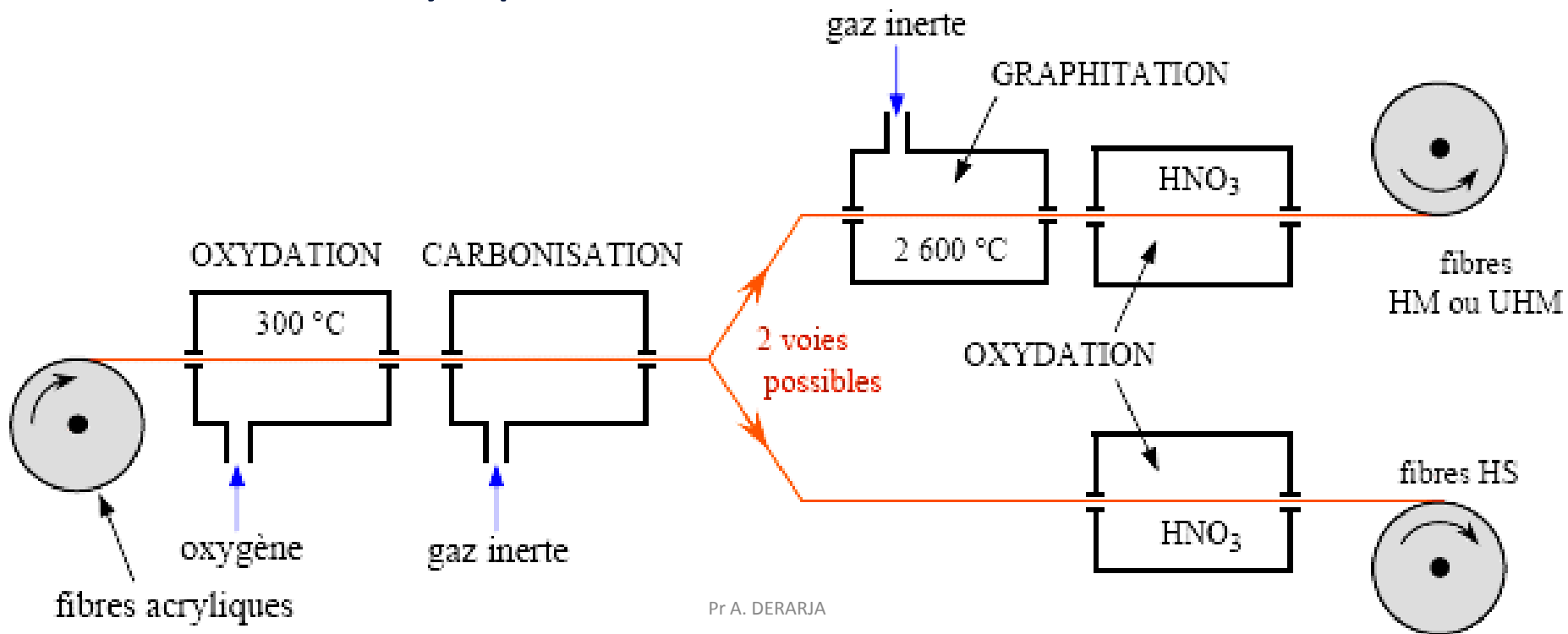
LES FIBRES DE CARBONE

- ✓ Très bonnes caractéristiques mécaniques,
- ✓ Prix élevé
- ✓ Allongement à rupture insuffisant

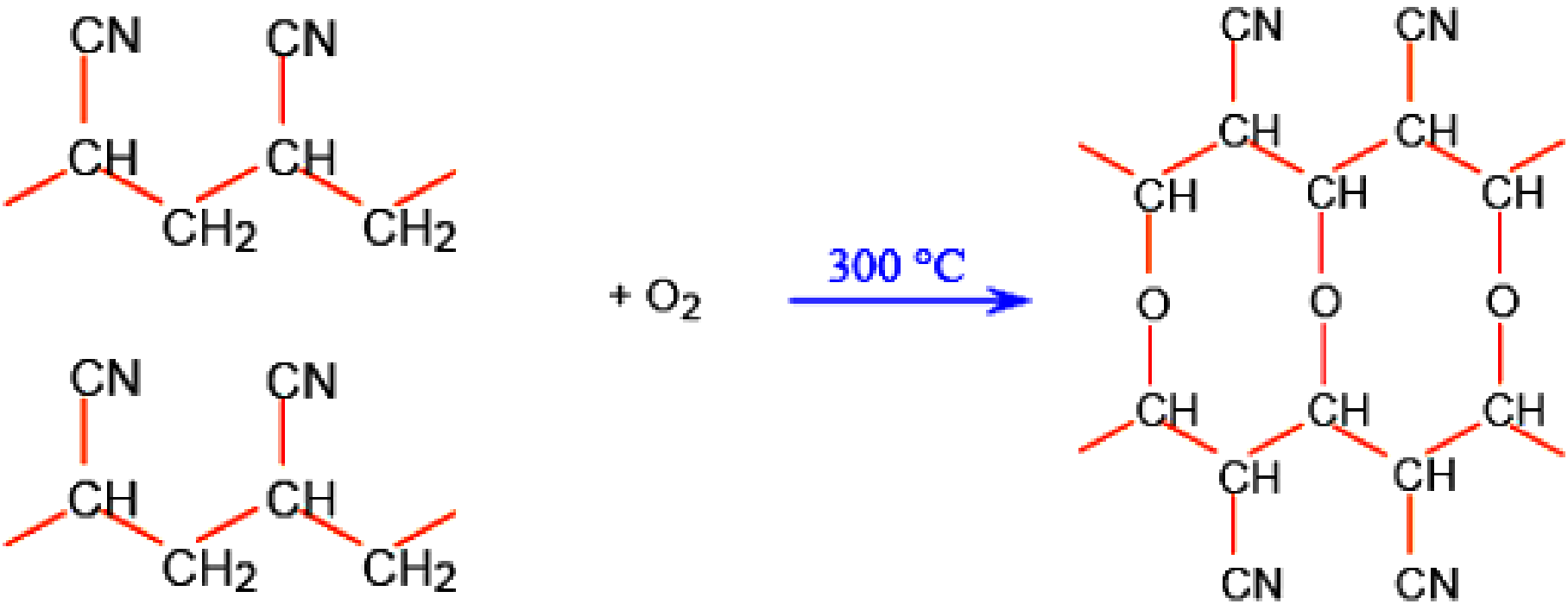


Procédé d'élaboration des fibres de carbone

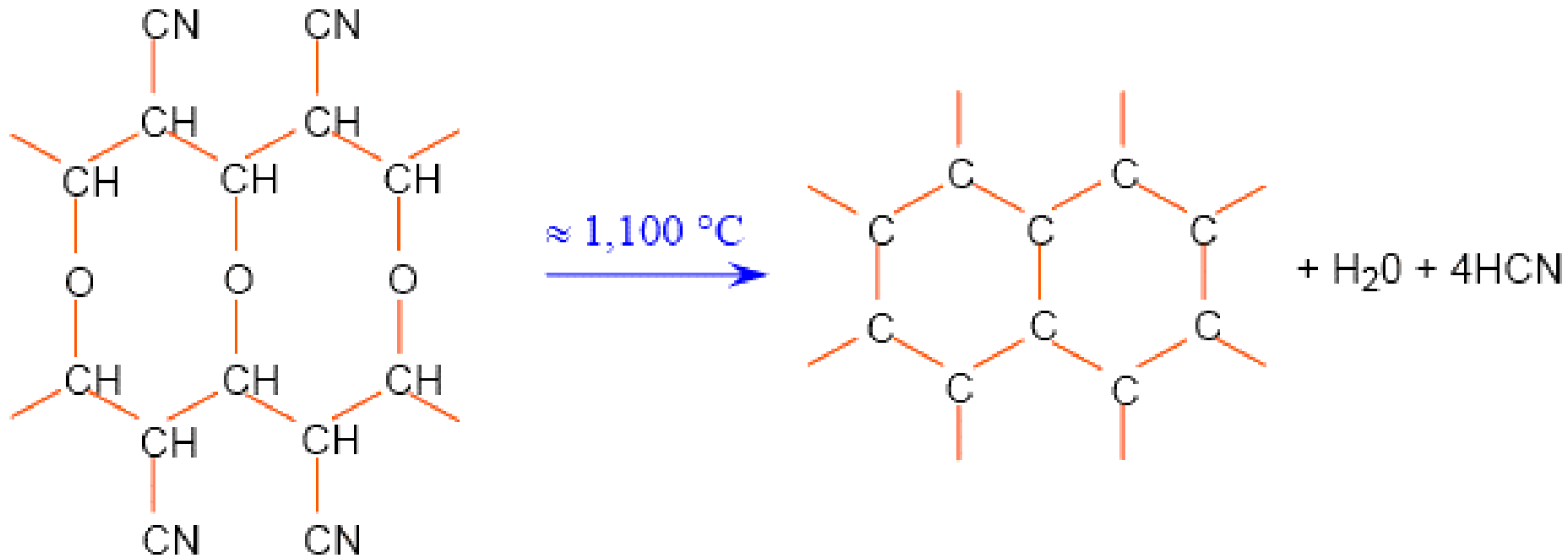
Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur se présentant, lui-même, sous forme de fibres orientées et réticulées. Les fibres utilisées sont les fibres acryliques.



L'oxydation: Une réticulation des chaines moléculaires



La carbonisation: Un chauffage en atmosphère inerte. Les fibres obtenues soit HR (haute résistance), soit HT (haute ténacité)



La graphitisation: Cette phase consiste à effectuer une pyrolyse des fibres, en atmosphère inerte, à de hautes températures ($> 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$) afin d'élever leur module d'Young. Les fibres obtenues sont HM (haut module) ou THM (très haut module).

Le traitement de surface: par oxydation ménagée en milieu acide (sulfurique ou nitrique) afin d'améliorer la liaison fibre-résine.

LES FIBRES D'ARAMIDE

Kevlar

- ✓ Tenue à l'impact (applications balistiques)
- ✓ Absorption des vibrations, amortissement
- ✓ Prix élevé



Pr A. DERARJA
Fibre d'aramide tissée



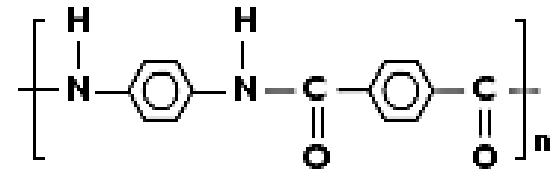
Enroulement en bobine

Procédé d'élaboration des fibres d'aramide

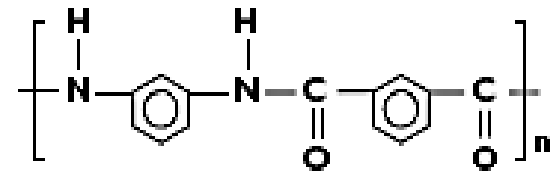
Les fibres d'aramide sont des fibres organiques artificielles obtenues en 3 ou 4 étapes:

- Etape de polymérisation:
- Mise en solution du polymère dans l'acide sulfurique,
- Filage par voie humide avec coagulation dans l'eau,
- Traitement thermique et étirage (pour les fibres à haut module)

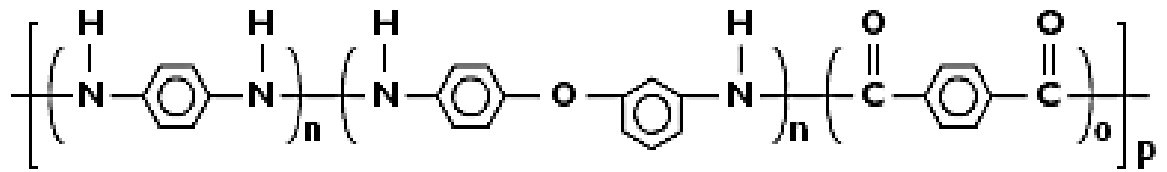
Para-aramides



Méta-aramides



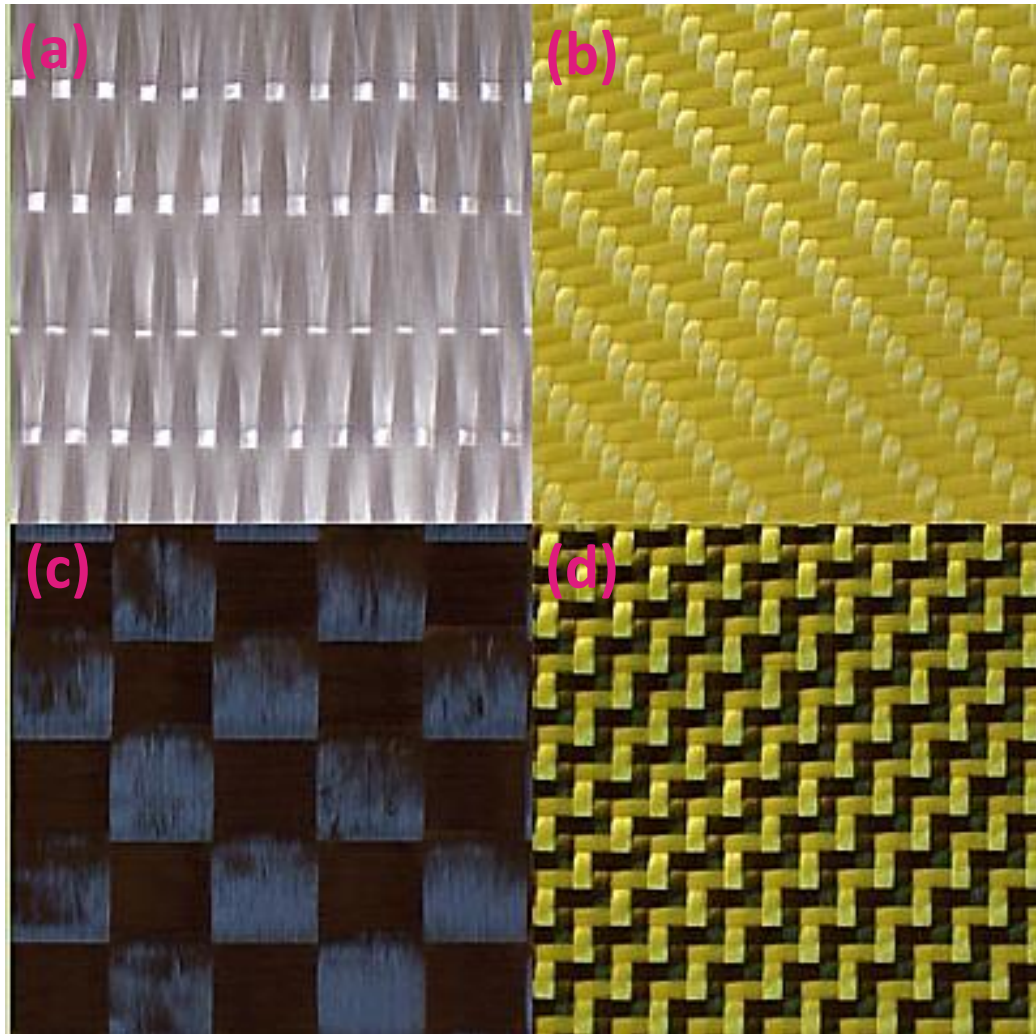
Copolymères de para-aramide



Pr A. DERARJA

La pièce principale d'un casque militaire est composée d'une matrice de résine phénolique et de renfort de fibres aramides moulé par compression.

Le tissage est identique à celui d'un tissu traditionnel



(a) Armure unidirectionnelle de fibres de verre ; (b) sergé de fibres d'aramide ; (c) toile de fibres de carbone ; (d) sergé de fibres de carbone et de fibres aramides.

LES FIBRES NATURELLES

Lin, chanvre, sisal...

- ✓ Alternative intéressante aux fibres de verre car elles peuvent être brûlées.
- ✓ Ces fibres se travaillent facilement avec les technologies du textile (tissage).



- ✓ La reproductibilité de leurs caractéristiques physiques n'est pas parfaitement maîtrisée

MISE EN ŒUVRE ET STRUCTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES À MATRICE POLYMÉRIQUE

Procédés en moule ouvert

Ces procédés sont caractérisés par des taux élevés d'émission de composants organiques volatiles (COV) comme le styrène.

- moulage au contact,
- moulage par projection simultanée ...

/ Procédés en moule fermé

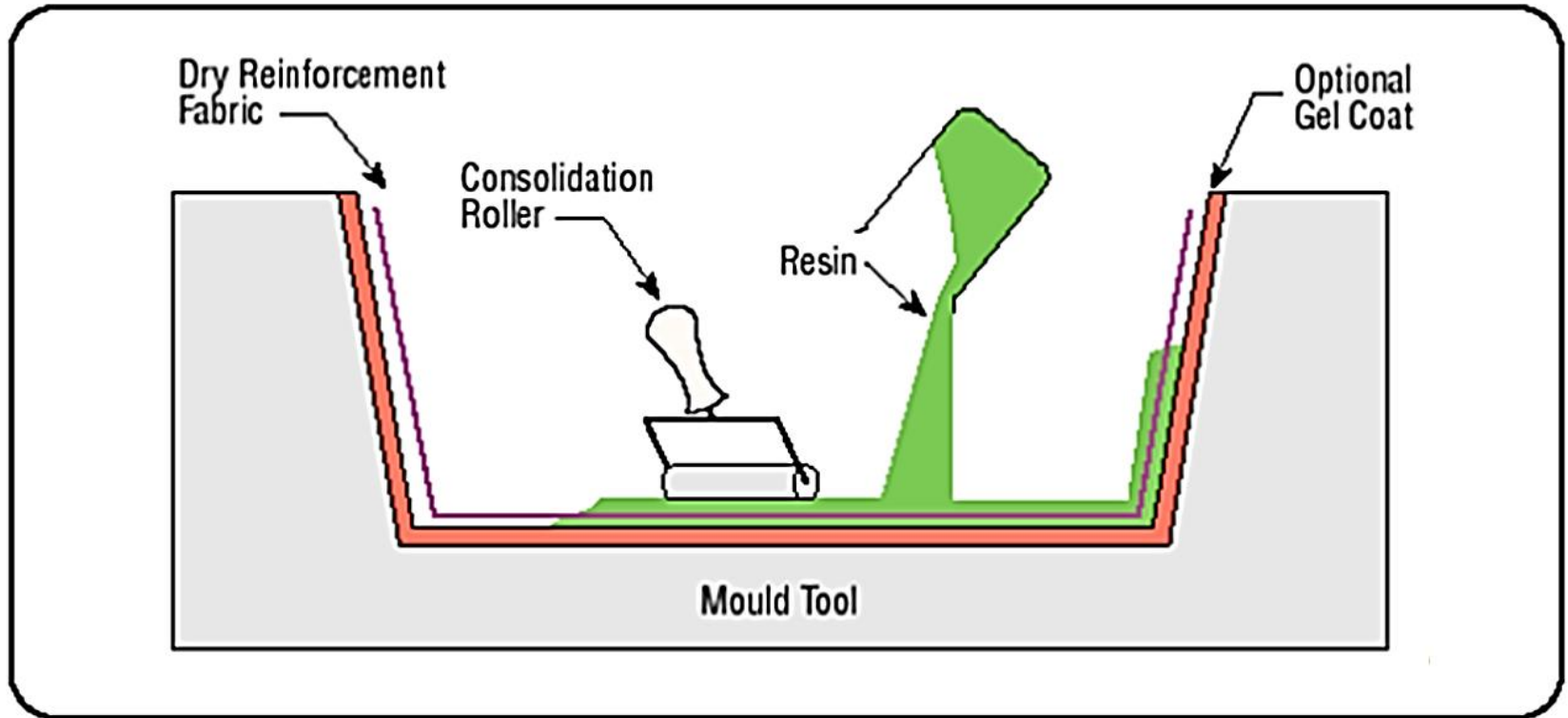
le moule est fermé et il reste étanche dès l'introduction de la matrice jusqu'à la solidification de la pièce.

- procédés d'infusion,
- moulage par transfert de résine ...

Etapes de mise en œuvre

- **Préparation de l'outillage:** nettoyage du moule + application des couches d'un produit démoulant.
- **Moulage:** Déposer le renfort et la matrice à la surface de l'outillage. La mise en forme de la matière peut se faire d'un seul coup ou en plusieurs étapes.
- **Compactage:** Application d'une pression afin d'obtenir le taux volumique de fibres souhaité.
- **Polymérisation:** Solidification de la matrice par cuisson de la pièce, à température ambiante ou à haute température.
- **Démoulage et parachèvement:** Retrait de la pièce du moule et détournage de son bord.

Moulage au contact



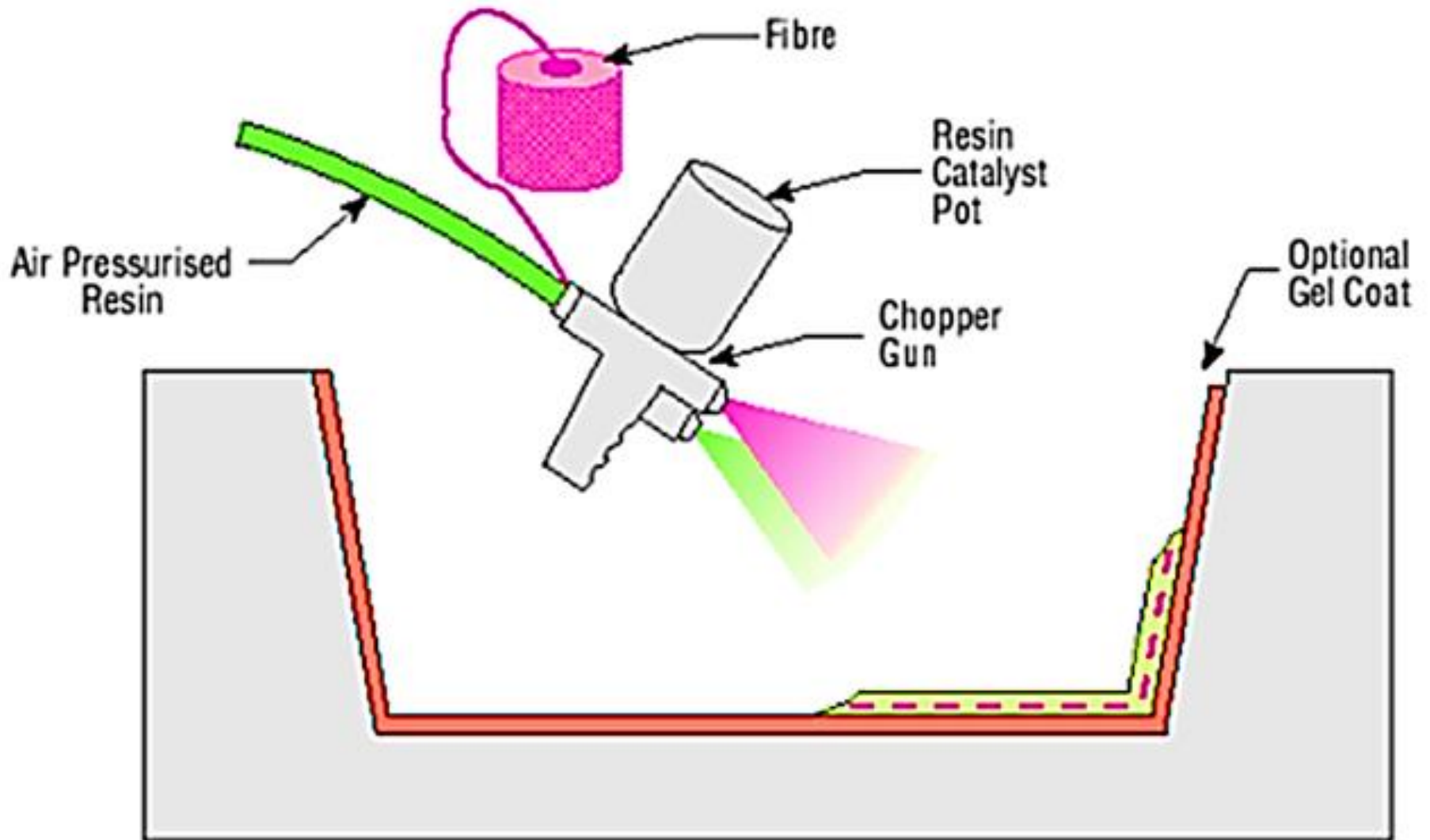
Le procédé consiste à déposer :

- une couche de surface (gel coat)
- des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante.

Exemple : élaboration d'une coque de bateau



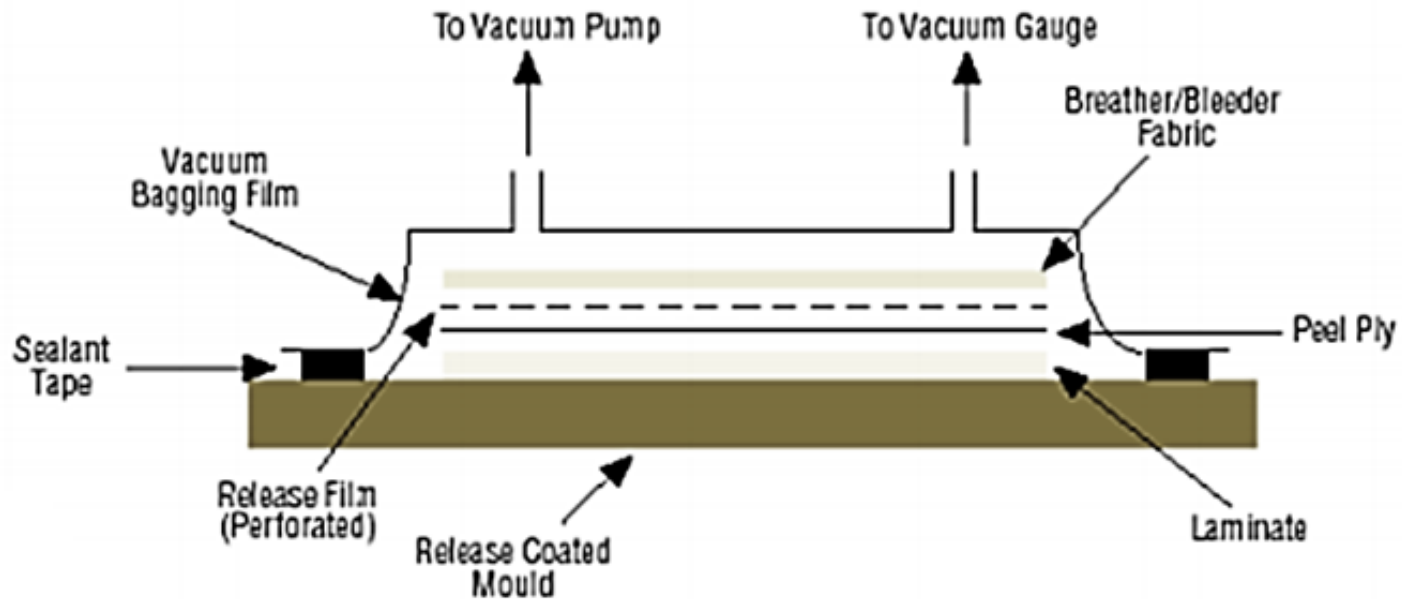
Moulage par projection simultanée





- Le moule, enduit d'un agent de démoulage, reçoit la couche de surface (gel-coat).
- La résine catalysée et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet.
- Une imprégnation manuelle, à l'aide de rouleaux ébulleurs, est nécessaire.
- La polymérisation se fait à température ambiante.

Moulage sous vide



Le vide est utilisé pour permettre l'imprégnation progressive du renfort par la résine entre un moule (matrice) et un contre-moule (poinçon).

Vide poussé: la pression est proche de la pression atmosphérique.

Vide partiel: la pression est égale à la différence des pressions entre l'extérieur et l'intérieur du moule.

- On utilise simultanément le vide et une pression atmosphérique.
- On dispose le renfort sur un moule rigide enduit de gel-coat , puis on coule la matrice.
- On emboîte le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité.
- On se sert d'une pompe à vide qui crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine.

Exemple: Élaboration « maison » d'une paire de skis



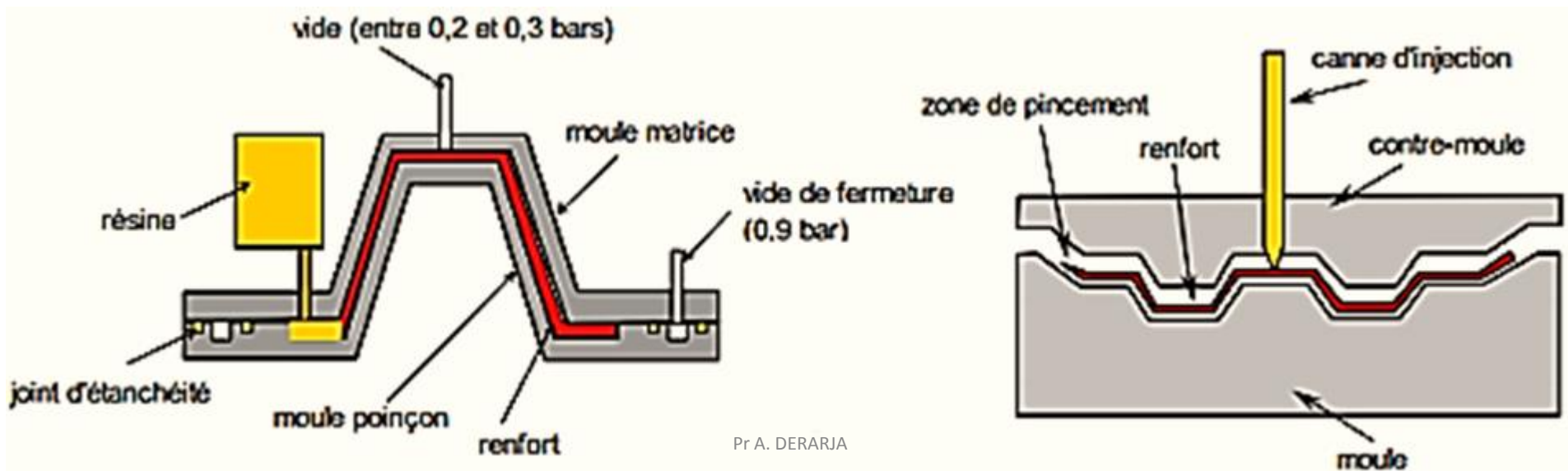
Mise sous vide de l'ensemble
puis cuisson selon un cycle de
température contrôlé.



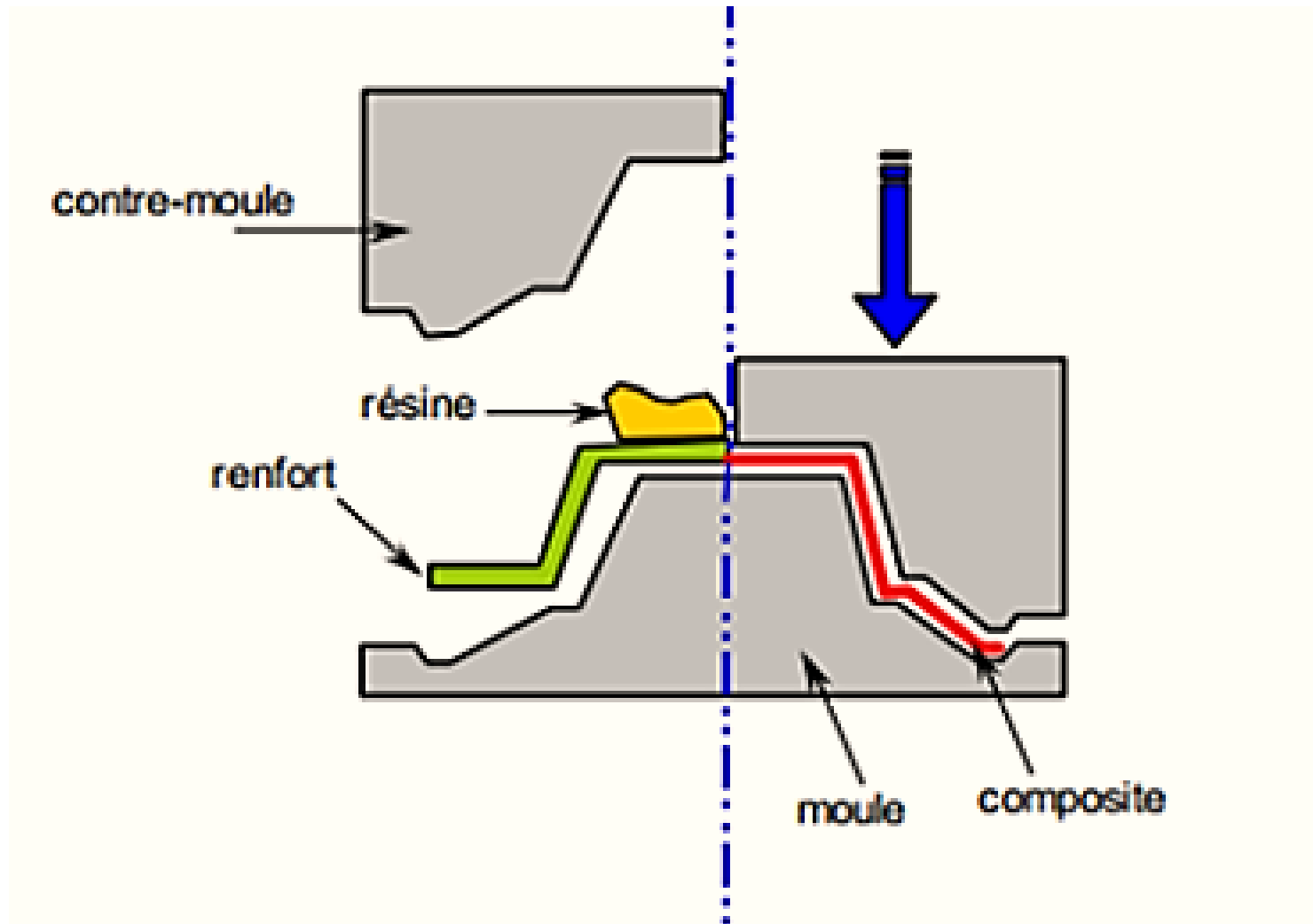
Mise en place des différents tissus
d'environnement utiles lors de la
cuisson

Moulage par injection de résine (Resin Transfer Moulding RTM)

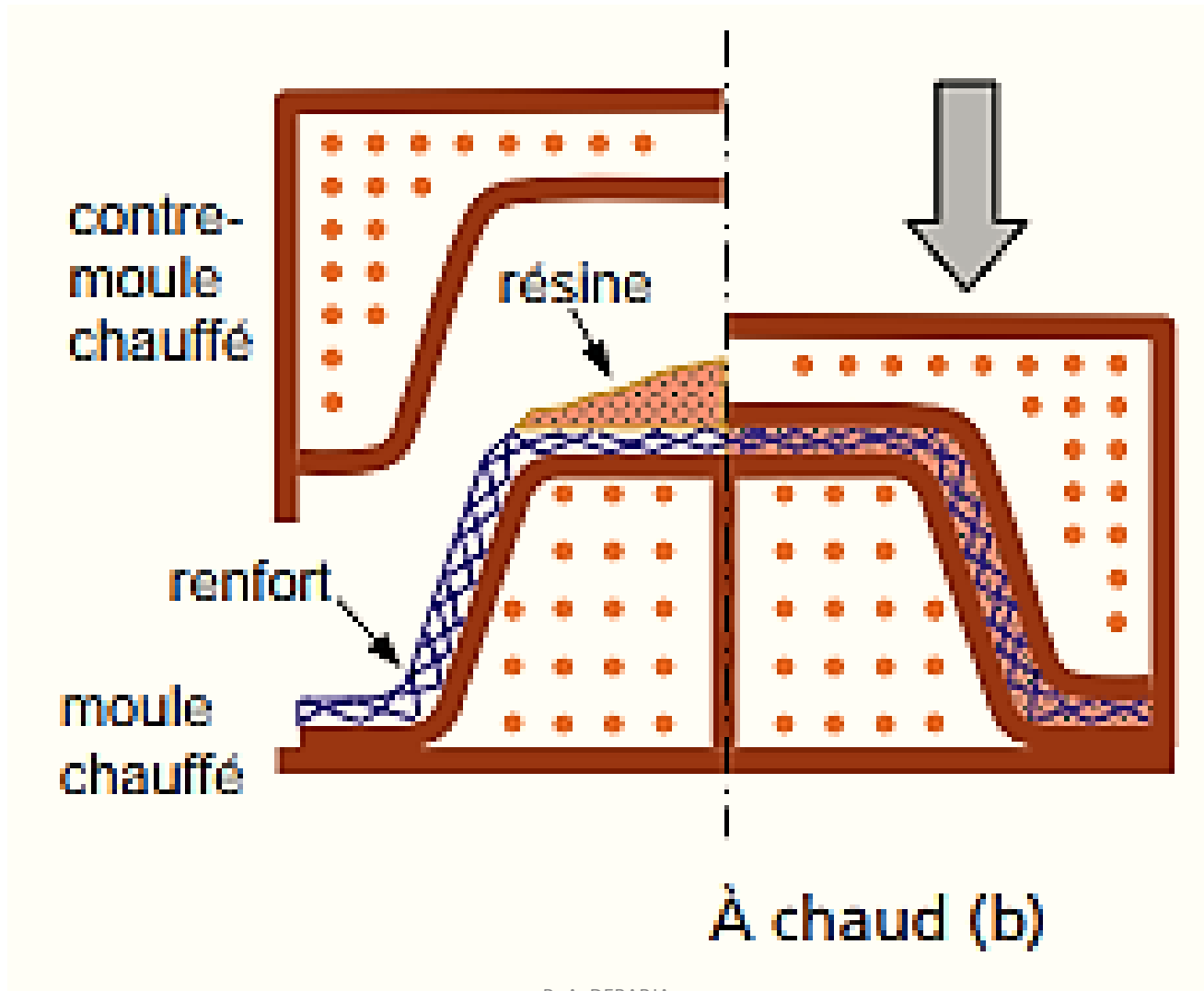
Cette technique permet d'imprégner un renfort, placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé, par injection de résine sous faible pression (1.5 à 4.5 bars)

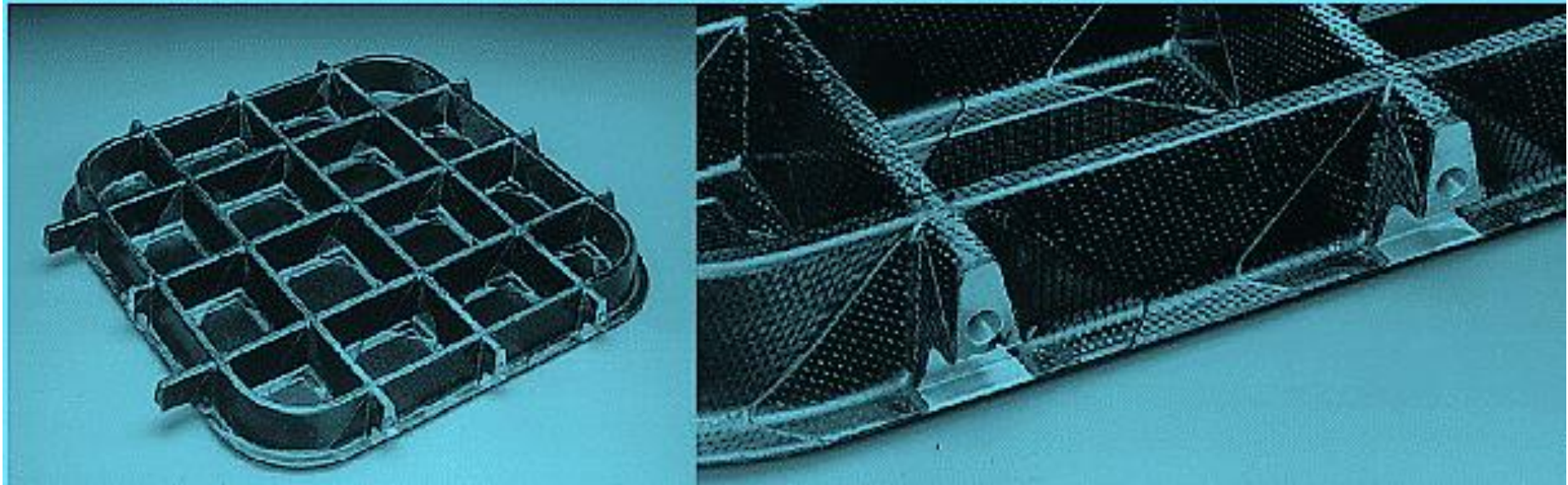


Moulage par compression à froid



Moulage par compression à chaud



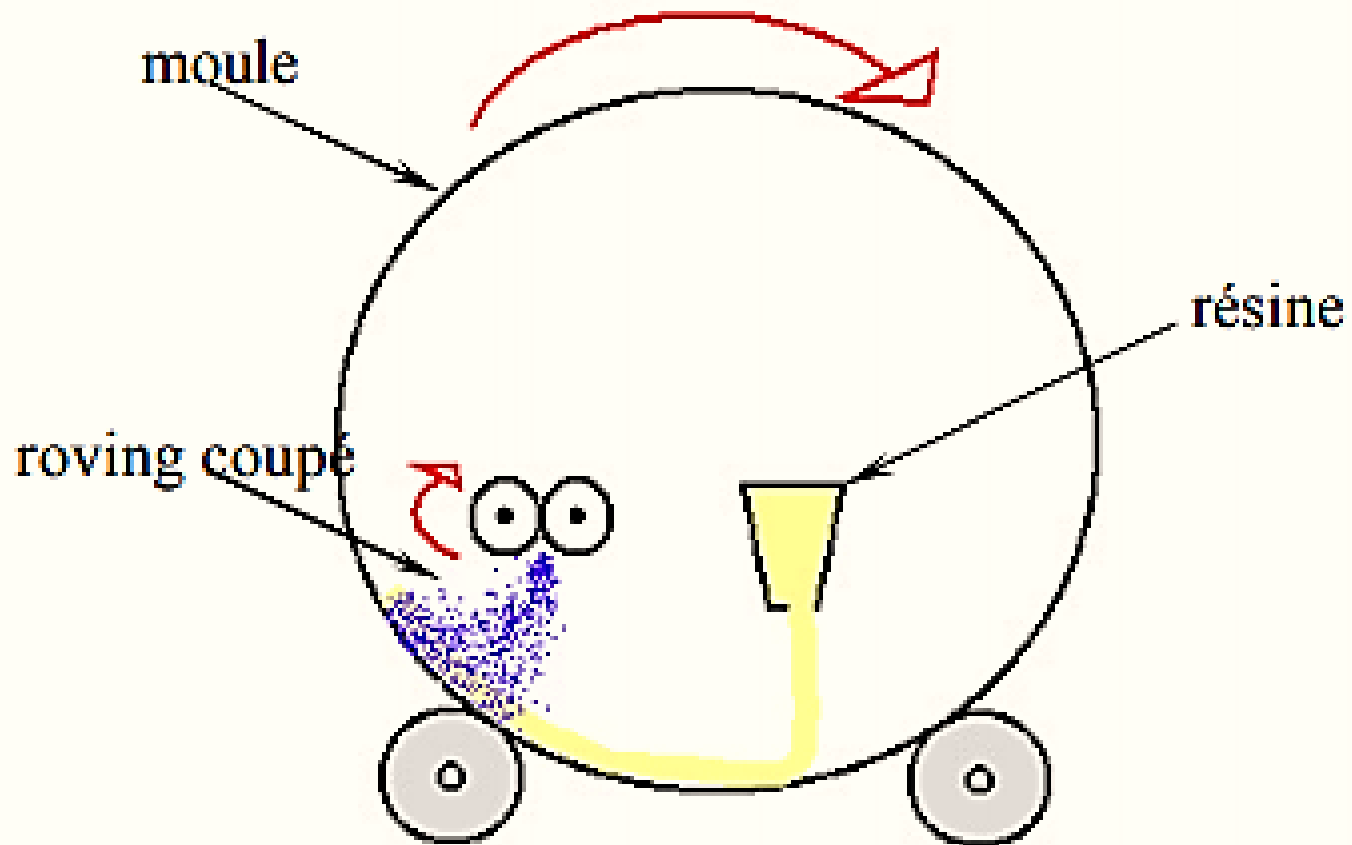


Porte de cargo d'un avion intégrant des raidisseurs
et des inserts métalliques

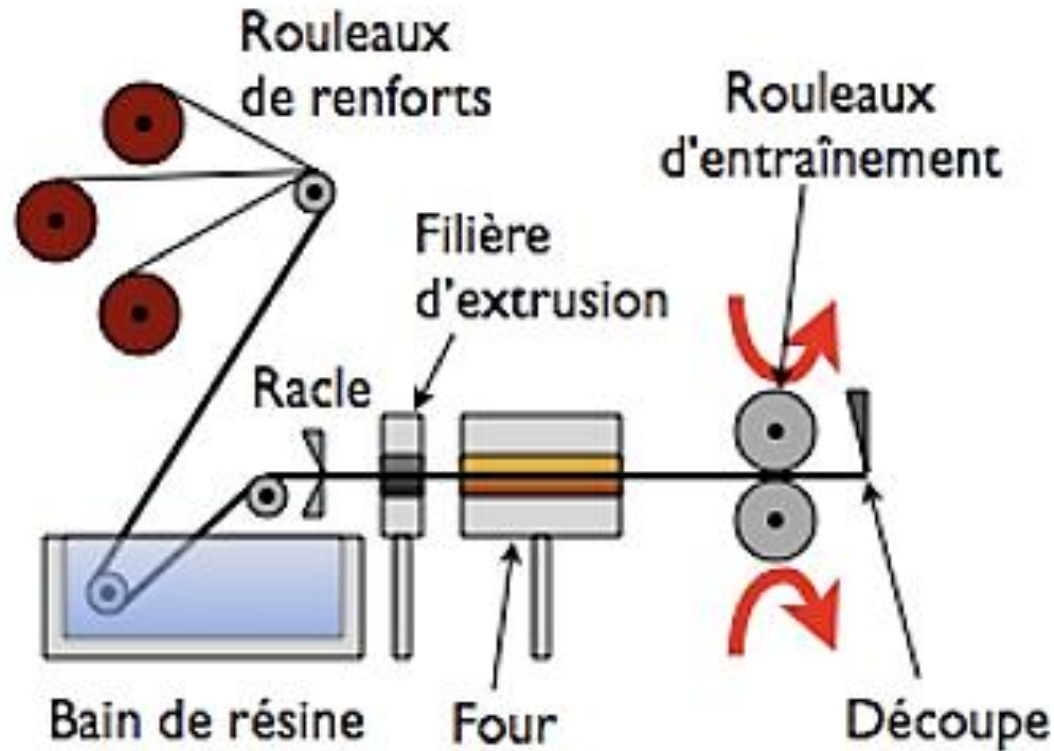
Moulage en continu

- ✓ La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.),
- ✓ Réalisation de la mise en forme,
- ✓ Polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur (15 à 50 m) est fonction de la température et de la résine,
- ✓ Refroidissement et découpage.

Moulage par centrifugation



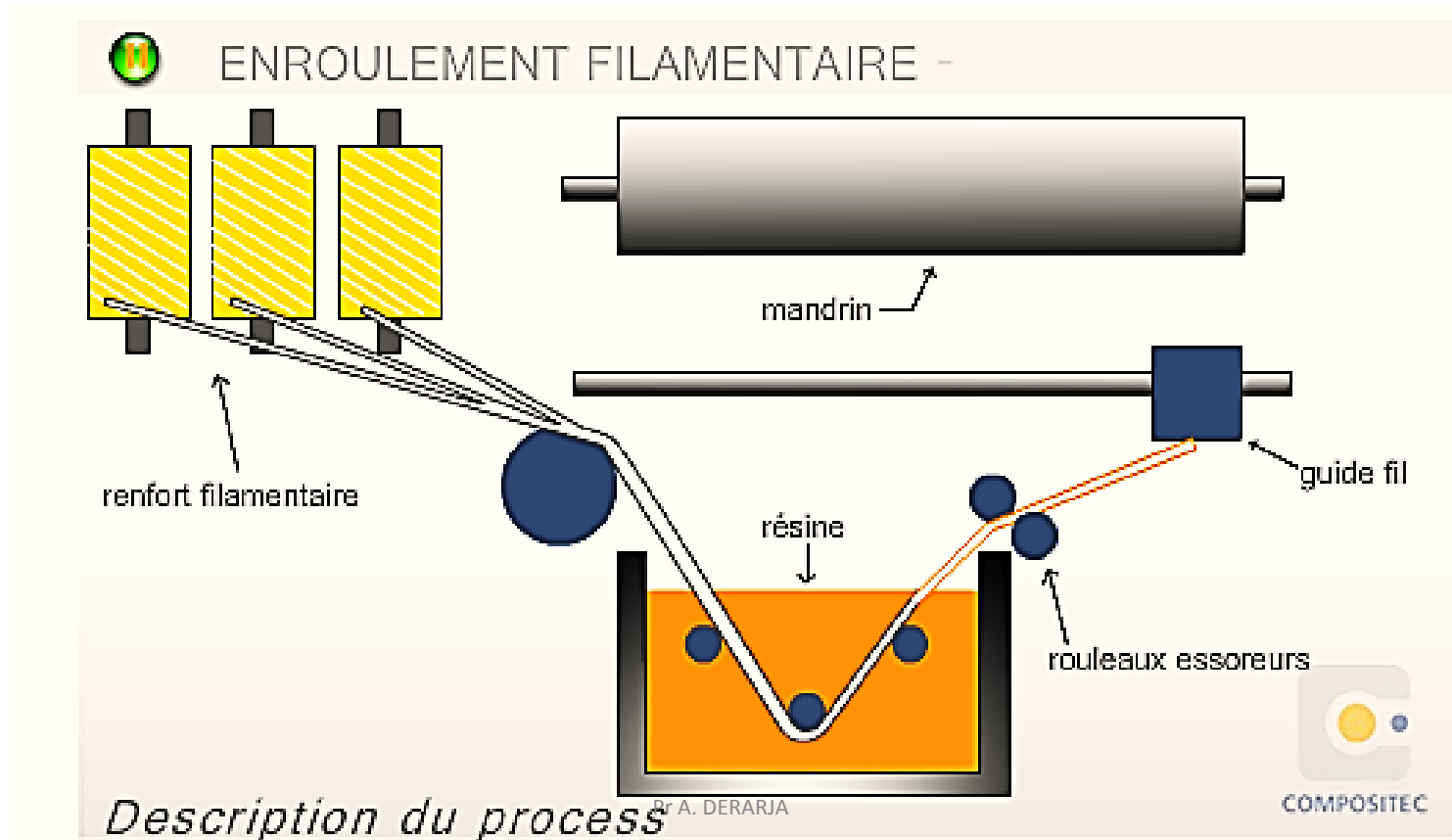
Moulage par pultrusion



La pultrusion est destinée à créer des profilés de sections quelconques, qui consiste à faire passer des fibres imprégnées de résine à travers une filière d'extrusion, en les «tirant» à l'aide de rouleaux.

Enroulement filamentaire

Le procédé consiste à enrouler un renfort continu imprégné de résine sur un mandrin tournant. Le taux de fibres peut atteindre 85% en volume.





Pour les thermodurcissables, les renforts sous forme de rovings sont enroulés autour d'un mandrin, après passage dans un bain de résine catalysée.

Pour les thermoplastiques, les renforts pré-assemblés de matrice thermoplastique sont enroulés autour d'un mandrin. L'enroulement s'effectue sur un moule mis en rotation.



Matière première sous
forme de de fibres de
verre ou de carbone

Préimprégnés

Certains procédés de mise en forme ne font pas appel à des fibres et de la matrice séparés, mais à des semi-produits nommés pré-imprégnés couramment abrégés en prepregs, c'est-à-dire des plis ou des tissus déjà enduits de matrice semi-solide, fournis sous forme de feuilles ou de rouleaux.



Une feuille de pré-imprégné verre/époxy et son film de protection

Le moulage des préimprégnés

Les pré-imprégnés sont essentiellement utilisés pour les composites à matrices organiques thermodurcissables. Souvent, il s'agit de la fabrication des pièces à haute qualité pour l'aéronautique et leur production requiert des conditions de salle blanche afin de pouvoir contrôler le taux d'humidité et le taux de poussière.

La mise en forme de la matière consiste à enlever les films de protection des préimprégnés et de disposer les tissus sur un moule métallique ou lui-même en composite.

Ensuite on ajoute un ensemble de composants nécessaires à la fabrication mais qui seront enlevés en fin de fabrication.

la cinétique de la réaction de polymérisation doit être contrôlée avec soin, ce qui nécessite :

- de les stocker au froid afin de ralentir la réaction, au congélateur ou en chambre froide, et toujours pendant une durée limitée ;

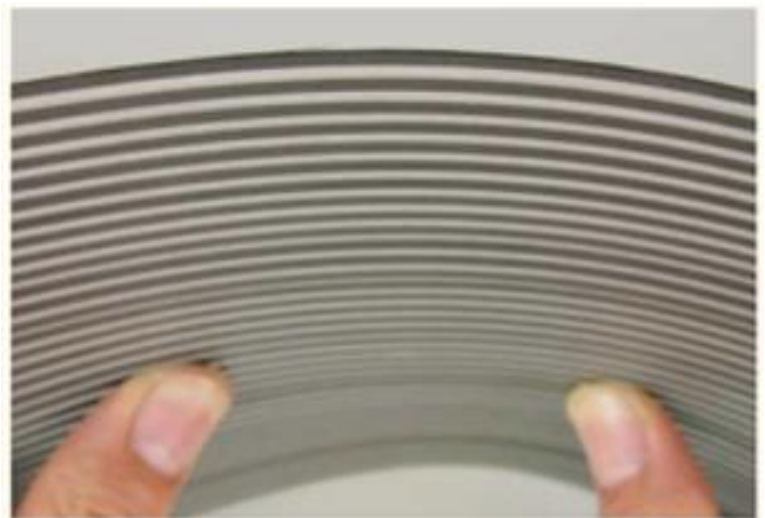
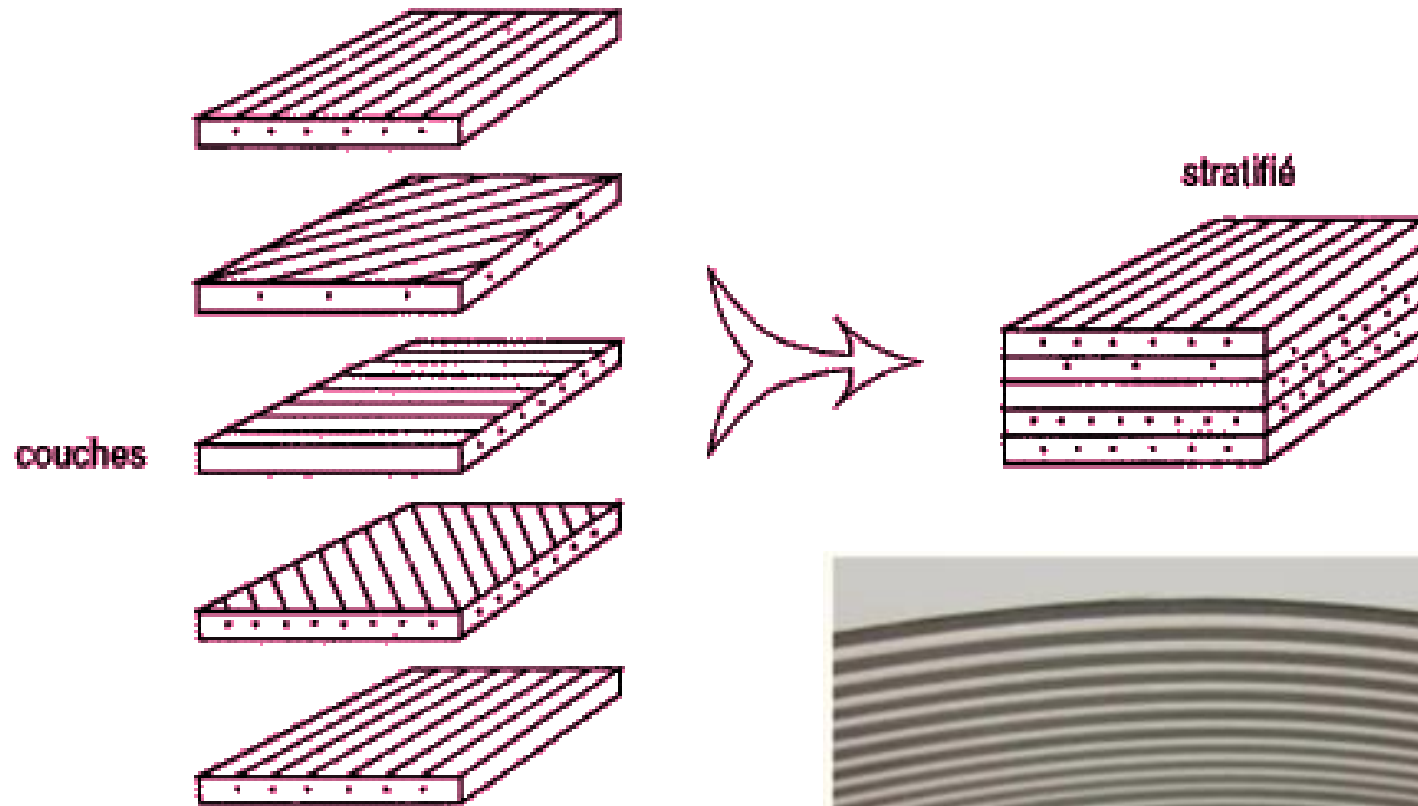
- de les mettre en forme à chaud et sous pression, généralement au four ou à l'autoclave.



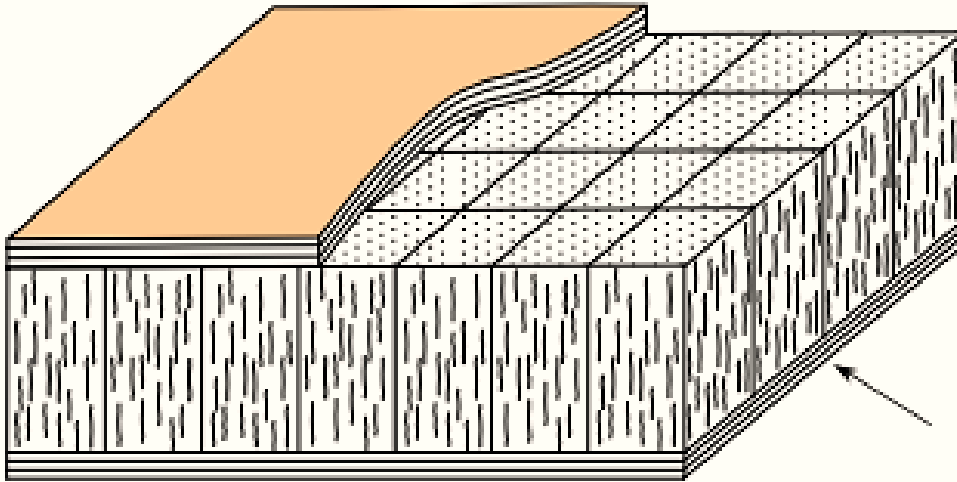
Equipement et outillage pour le moulage de préimprégnés (AIRTECH)

ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

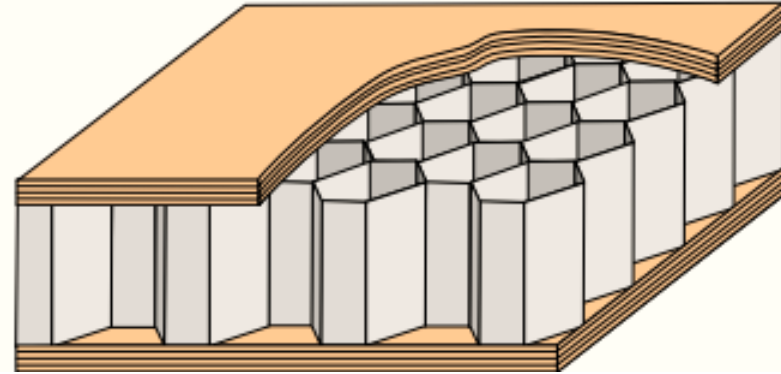
Stratifié



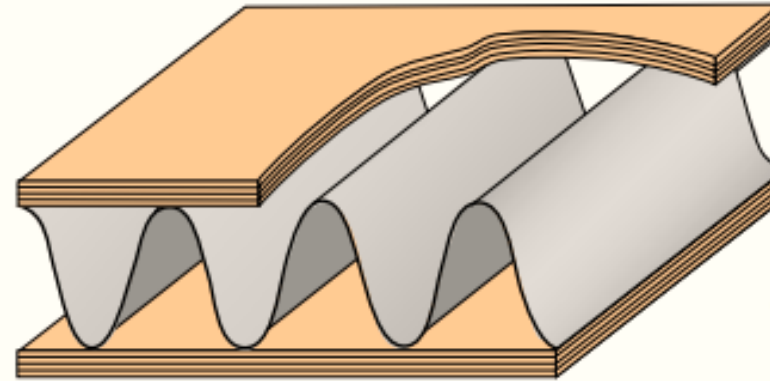
Sandwich



Ame pleine (mousse, résine,...)



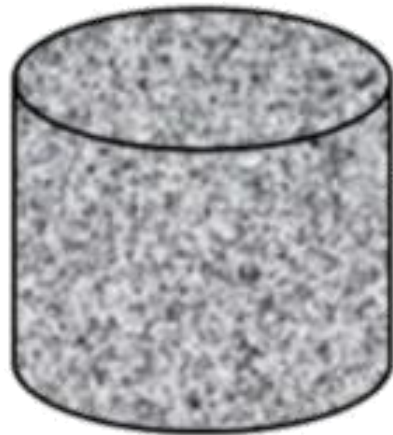
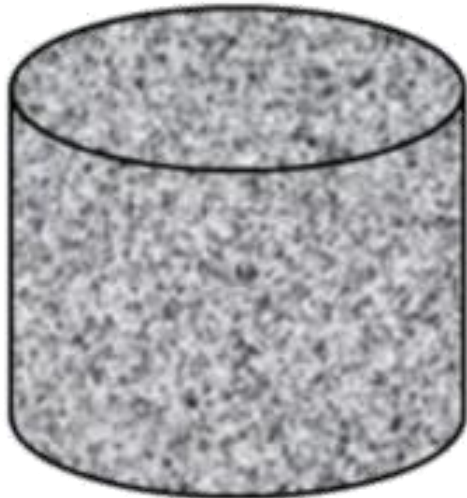
Ame en nid d'abeille



Ame ondulée

Volumique

Les composites volumiques ont été introduits pour des besoins spécifiques de l'aéronautique. Ils sont élaborés à partir de tissages volumiques.



REFERENCES

- [1] Jean Marie Berthelot, Matériaux composites, 5^{ème} Edition Lavoisier,
- [2] <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>
- [3] http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Prepreg_Technology.pdf
- [4] <https://www.yumpu.com/en/document/read/29337125/composite-materials-handbook-the-whole-building-design-guide>